



ESCOLA NAVAL

ta sainte & bi-faire



Ana Carolina dos Reis Sintra

**Estudo comparativo dos diferentes sistemas AIP
existentes utilizando lógica difusa**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha



Alfeite

2021



ESCOLA NAVAL

talante e biefaire



Ana Carolina dos Reis Sintra

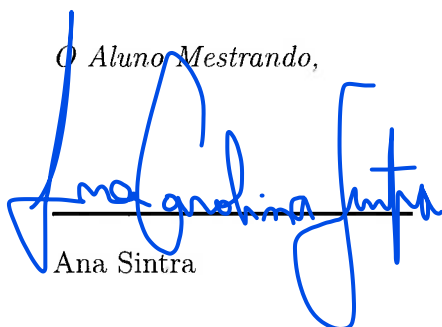
*Estudo comparativo dos diferentes sistemas AIP
existentes utilizando lógica difusa*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha

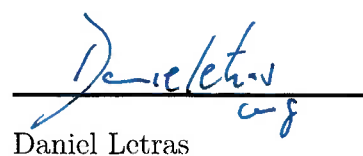
Orientação de: CMG M Daniel Véstias Letras

Co-orientação de: Prof. AUX Ricardo Pinto Moura

O Aluno Mestrando,


Ana Sintra

O Orientador,


Daniel Letras

Alfeite
2021

"Success is walking from failure to failure with no loss of enthusiasm"

Winston Churchill

À minha família.

Agradecimentos

Antes de iniciar a minha dissertação de mestrado, preciso de agradecer e realçar o esforço e disponibilidade incondicional que me foram dados para a elaboração da mesma.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador Capitão-de-mar-e-guerra Véstias Letras, por todo o apoio, disponibilidade e conhecimento prestado, ao longo de todo este processo.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer ao meu Coorientador Senhor Professor Ricardo Moura e ao Capitão-tenente EN-MEC Marcelino Ruivo, pela paciência e por todo o auxílio prestado para a elaboração da dissertação, ajudando-me a ultrapassar todos os desafios que ia encontrando ao longo da elaboração da mesma.

À guarnição do NRP *Álvares Cabral*, por me terem acolhido durante três meses e por todo o conhecimento que passaram ao longo do estágio. Foi sem dúvida um dos momentos mais marcantes da minha vida na Marinha e vou levá-lo comigo para sempre.

Ao meu curso, Capitão-tenente Raúl Alexandre Cascais, por todos os momentos e vivências partilhadas ao longo destes cinco anos. Foram sem dúvida a minha segunda família.

Aos meus camaradas e amigos, Joana Jerónimo, Teresa Costa, Tiago Rodrigues, Susana Bernardo e Tirsa Arriscado, por todos os momentos partilhados, pelo apoio incondicional e por me tornarem todos os dias uma pessoa melhor. Não tenho palavras.

Para finalizar, à minha família por toda a dedicação e apoio incondicional ao longo da minha vida. Graças a eles sou a pessoa que sou hoje.

Um muito obrigado a todos.

Resumo

Os submarinos são meios que primam pela discrição, no entanto, os de propulsão convencional, como é o caso dos portugueses, necessitam de vir regularmente à cota periscópica para recarregarem as suas baterias, ficando mais vulneráveis e expostos ao adversário. Para minimizar esse efeito, foram criados os sistemas AIP - "*Air Independent Propulsion*", cujo principal objetivo é a produção de energia com o submarino totalmente submerso.

Sendo estes sistemas relativamente jovens, e dado o seu desenvolvimento tecnológico emergente, torna-se necessária a criação de uma ferramenta que auxilie eficazmente na escolha do sistema mais adequado aos submarinos portugueses. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão (SAD) que auxilie nessa seleção.

Para a construção do sistema, foi necessário efetuar um estudo comparativo entre os quatro sistemas AIP existentes, nomeadamente as células de combustível, os motores de ciclo Stirling, as turbinas a vapor de ciclo fechado e os motores a Diesel de circuito fechado, por forma a extrair as características mais relevantes e essenciais à construção do sistema.

O SAD baseia-se então num sistema difuso de duas fases baseado no modelo de Mamdani. A primeira fase permite a obtenção de três valores de referência que servem de auxílio no processo de decisão ao nível operacional, económico e ambiental. A segunda fase usa esses três valores para criar um valor percentual de recomendação de seleção do sistema. As regras lógicas base do sistema foram criadas apoiando-se nas respostas obtidas num questionário realizado a 21 especialistas versados no assunto.

Por fim, é aplicado o sistema difuso aos quatro tipos genéricos de AIP's para apurar tanto o nível de recomendação como também os valores das dimensões da primeira fase.

Palavras-chave: Submarinos, sistemas AIP, difuso, Mamdani

Abstract

Submarines are means that excel on covertness, however, those with conventional propulsion, such as the Portuguese, need to come regularly to the periscopic depth to recharge their batteries, becoming more vulnerable and exposed to the opponent. To minimize this effect, the AIP systems - "*Air Independent Propulsion*" were created, whose main objective is the production of energy with the submarine fully submerged.

As these systems are relatively young, where their technological development is emerging, it's necessary to create a tool that will efficiently and effectively help in choosing the most suitable system for Portuguese submarines. Thus, this work aims to develop a decision support system to assist in this selection.

For the construction of the system, it was necessary to carry out a comparative study between the four existing AIP systems, namely fuel cells, Stirling cycle engines, closed cycle steam turbines and closed cycle diesel engines, in order to extract the most relevant and essential characteristics for the construction of the system.

The system is then based on a two-phase *fuzzy* system based on the Mamdani model. The first phase allows the obtaining of three reference values that serve as an aid in the decision process at the operational, economic and environmental level. The second phase uses these three values to create a percentage system selection recommendation value. The logical rules base of the system were created based on the answers obtained in a questionnaire carried out to 21 experts versed in the subject.

Finally, the fuzzy system is applied to the four generic types of AIP's to determine both the level of recommendation and the values of the dimensions of the first phase.

Keywords: Submarine, AIP systems, *fuzzy*, Mamdani

Índice

| | |
|--|-----------|
| Introdução | 1 |
| 1 Estado da Arte e Conceitos Teóricos | 5 |
| 1.1 Introdução | 5 |
| 1.2 Submarinos em Portugal: Classe <i>Tridente</i> | 7 |
| 1.3 Principais características da Classe <i>Tridente</i> | 9 |
| 1.3.1 Características Técnicas da Plataforma | 9 |
| 1.3.2 Configuração da Plataforma | 10 |
| 1.3.3 Armazenamento e produção de energia | 11 |
| 1.3.4 Propulsão | 13 |
| 1.3.5 Autonomia | 13 |
| 2 Sistemas Adjacentes | 15 |
| 2.1 Células de Combustível | 16 |
| 2.1.1 Princípios base das células de combustível | 17 |
| 2.1.2 Vantagens e Desvantagens | 18 |
| 2.2 Motores de ciclo Stirling | 19 |
| 2.2.1 Funcionamento dos motores de ciclo de Stirling | 20 |
| 2.2.2 Vantagens e Desvantagens | 21 |
| 2.3 Turbinas a vapor de ciclo fechado | 22 |
| 2.3.1 Funcionamento das turbinas a Vapor de Ciclo Fechado | 22 |
| 2.3.2 Vantagens e Desvantagens | 23 |
| 2.4 Motores a Diesel de Circuito Fechado | 24 |
| 2.4.1 Funcionamento dos Motores a Diesel de Circuito Fechado | 24 |
| 2.4.2 Vantagens e Desvantagens | 26 |
| 3 Lógica Difusa | 27 |
| 3.1 Introdução | 27 |
| 3.2 Teoria dos conjuntos difusos | 28 |
| 3.2.1 Conjuntos difusos e função de pertença | 29 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.2 | Operações lógicas | 31 |
| 3.2.3 | Regras lógicas | 33 |
| 3.3 | Etapas do raciocínio difuso | 34 |
| 3.4 | Modelo Mamdani | 36 |
| 3.5 | Outros modelos | 39 |
| 4 | Desenvolvimento do sistema de apoio à decisão | 41 |
| 4.1 | Introdução | 41 |
| 4.2 | Metodologia | 42 |
| 4.3 | Variáveis de entrada | 43 |
| 4.3.1 | Dimensão operacional | 44 |
| 4.3.2 | Dimensão económica | 49 |
| 4.3.3 | Dimensão ambiental | 51 |
| 4.4 | Variável de saída | 54 |
| 4.5 | Validação dos dados | 56 |
| 5 | Aplicação do Sistema e Discussão dos Resultados Obtidos | 57 |
| 5.1 | Aplicação dos dados | 57 |
| 5.1.1 | Eficiência | 58 |
| 5.1.2 | Potência | 58 |
| 5.1.3 | Assinatura Acústica | 58 |
| 5.1.4 | Custo de aquisição | 59 |
| 5.1.5 | Custo de Manutenção | 60 |
| 5.1.6 | Custo de Operação | 60 |
| 5.1.7 | Emissão Térmica | 61 |
| 5.1.8 | Subproduto | 61 |
| 5.1.9 | Tamanho | 62 |
| 5.2 | Discussão dos resultados | 63 |
| 5.2.1 | Células de combustível | 63 |
| | Dimensão Operacional | 63 |
| | Dimensão Económica | 64 |
| | Dimensão Ambiental | 65 |
| | Nível de Recomendação | 66 |
| 5.2.2 | Motores de Sirling | 67 |
| | Dimensão Operacional | 67 |
| | Dimensão Económica | 68 |
| | Dimensão Ambiental | 69 |
| | Nível de Recomendação | 70 |

| | | |
|-------|--------------------------------|------------|
| 5.2.3 | Turbinas a vapor | 71 |
| | Dimensão Operacional | 71 |
| | Dimensão Económica | 72 |
| | Dimensão Ambiental | 73 |
| | Nível de Recomendação | 74 |
| 5.2.4 | Motores a Diesel | 75 |
| | Dimensão Operacional | 75 |
| | Dimensão Económica | 76 |
| | Dimensão Ambiental | 77 |
| | Nível de Recomendação | 77 |
| | Conclusão | 80 |
| | Bibliografia | 83 |
| | Apêndices | 89 |
| | A Questionário | 89 |
| | B Tratamento dos dados | 95 |
| | Anexos | 99 |
| | I Base das regras | 99 |
| | II Regras Ativadas | 111 |
| II.1 | Células de combustível | 111 |
| II.2 | Motores de Stirling | 114 |
| II.3 | Turbinas a Vapor | 116 |
| II.4 | Motores a Diesel | 118 |
| | III Validação dos dados | 121 |
| III.1 | Dimensão operacional fixa | 121 |
| III.2 | Dimensão económica fixa | 124 |
| III.3 | Dimensão ambiental fixa | 127 |
| | IV Código do programa | 131 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Submarino NRP <i>Tridente</i> (2009 - atualmente) (Sá, 2020) | 8 |
| 1.2 | Esquema sistema elétrico dos submarinos da Classe <i>Tridente</i> («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.) | 10 |
| 1.3 | Porões de armazenamento das baterias («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.) | 11 |
| 1.4 | Esquema dos módulos das células de combustível e sistemas auxiliares («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.) | 12 |
| 2.1 | Diagrama P-V do ciclo de Stirling («Motor Stirling», s.d.) | 20 |
| 2.2 | Diagrama P-V do ciclo Diesel («Questão 121», 2017) | 25 |
| 3.1 | Comparação entre a lógica clássica e a lógica difusa (Kohagura, 2007) | 28 |
| 3.2 | Exemplos mais comuns de funções de pertença: triangular, trapezoidal e gaussiana, respetivamente (adaptado de Sousa, 2014) | 30 |
| 3.3 | Conjunto difusos A e B, respetivamente (adaptado de Sousa, 2014) | 31 |
| 3.4 | Interseção dos conjuntos difusos A e B (adaptado de Sousa, 2014) | 32 |
| 3.5 | União dos conjuntos difusos A e B (adaptado de Sousa, 2014) | 32 |
| 3.6 | Complemento do conjunto difuso A (adaptado de Sousa, 2014) | 33 |
| 3.7 | Esquema do Raciocínio Difuso (adaptado de Sousa, 2014) | 35 |
| 3.8 | Conjuntos difusos de saída parciais obtidos segundo Mamdani | 38 |
| 3.9 | Conjunto difuso de saída final segundo Mamdani | 38 |
| 3.10 | Desfuzzificação pelo centróide no conjunto difuso de saída final | 39 |
| 4.1 | Processo de definição de variáveis, subcategorias e nível de recomendação | 42 |
| 4.2 | Subcategorias e respetivas características eleitas para avaliar um sistema AIP | 44 |
| 4.3 | Funções pertença - Eficiência | 45 |
| 4.4 | Funções pertença - Potência | 47 |
| 4.5 | Funções pertença - Assinatura Acústica | 47 |
| 4.6 | Funções pertença - Dimensão Operacional | 48 |
| 4.7 | Funções pertença - Custo de Aquisição | 50 |

| | |
|--|----|
| 4.8 Funções pertença - Custo de Manutenção | 50 |
| 4.9 Funções pertença - Custo de Operação | 51 |
| 4.10 Funções pertença - Dimensão Económica | 51 |
| 4.11 Funções pertença - Emissão térmica | 52 |
| 4.12 Funções pertença - Subproduto | 53 |
| 4.13 Funções pertença - Tamanho | 54 |
| 4.14 Funções pertença - Dimensão Ambiental | 54 |
| 4.15 Funções pertença - Nível de Recomendação | 55 |
| 5.1 Conjunto difuso final da Dimensão Operacional das Células de Com- bustível | 64 |
| 5.2 Conjunto difuso final da Dimensão Económica das Células de Com- bustível | 65 |
| 5.3 Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental das Células de Com- bustível | 66 |
| 5.4 Conjunto difuso final do Nível de Recomendação das Células de Com- bustível | 67 |
| 5.5 Conjunto difuso final da Dimensão Operacional dos Motores de Stirling | 68 |
| 5.6 Conjunto difuso final da Dimensão Económica dos Motores de Stirling | 69 |
| 5.7 Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental dos Motores de Stirling | 70 |
| 5.8 Conjunto difuso final do Nível de Recomendação dos Motores de Stir- ling | 71 |
| 5.9 Conjunto difuso final da Dimensão Operacional das Turbinas a Vapor | 72 |
| 5.10 Conjunto difuso final da Dimensão Económica das Turbinas a Vapor | 73 |
| 5.11 Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental das Turbinas a Vapor | 74 |
| 5.12 Conjunto difuso final do Nível de Recomendação das Turbinas a Vapor | 75 |
| 5.13 Conjunto difuso final da Dimensão Operacional dos Motores a Diesel | 76 |
| 5.14 Conjunto difuso final da Dimensão Económica dos Motores a Diesel | 76 |
| 5.15 Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental dos Motores a Diesel | 77 |
| 5.16 Conjunto difuso final do Nível de Recomendação dos Motores a Diesel | 78 |
| 5.17 <i>Starplot</i> - Resultados finais | 79 |
| A.1 Subcategorias e respetivas variáveis | 89 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Vantagens e desvantagens - Células de combustível | 19 |
| 2.2 | Vantagens e desvantagens - Motores Sirling | 22 |
| 2.3 | Vantagens e desvantagens - Turbinas a vapor | 24 |
| 2.4 | Vantagens e desvantagens - Motores a Diesel | 26 |
| 4.1 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência da Eficiência | 45 |
| 4.2 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência da Potência | 46 |
| 4.3 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência da Assinatura Acústica | 47 |
| 4.4 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência da Dimensão Operacional | 48 |
| 4.5 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência dos Custos | 50 |
| 4.6 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência da Emissão Térmica | 52 |
| 4.7 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência dos Subprodutos | 53 |
| 4.8 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência do Tamanho | 53 |
| 4.9 | Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência do Nível de Recomendação | 55 |
| 5.1 | Dados de entrada das características das dimensões operacional, econômica e ambiental | 62 |
| 5.2 | Grau de pertinência e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Células de combustível | 63 |
| 5.3 | Grau de pertinência e respetiva classificação referentes à dimensão econômica - Células de combustível | 64 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.4 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Células de combustível | 65 |
| 5.5 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Células de combustível | 66 |
| 5.6 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Motores de Stirling | 67 |
| 5.7 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão económica - Motores de Stirling | 68 |
| 5.8 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Motores de Stirling | 69 |
| 5.9 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Motores de Stirling | 70 |
| 5.10 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Turbinas a Vapor | 71 |
| 5.11 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão económica - Turbinas a Vapor | 72 |
| 5.12 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Turbinas a Vapor | 73 |
| 5.13 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Turbinas a Vapor | 74 |
| 5.14 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Motores a Diesel | 75 |
| 5.15 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão económica - Motores a Diesel | 76 |
| 5.16 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Motores a Diesel | 77 |
| 5.17 | Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Motores a Diesel | 78 |
| 5.18 | Resultados finais obtidos | 78 |
| 5.19 | Nível de Recomendação - Pesos | 80 |

Lista de Equações

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Equação química - oxidação | 18 |
| 2.2 | Equação química - redução | 18 |
| 3.1 | Função de pertença | 29 |
| 3.2 | Representação matemática da lógica clássica | 29 |
| 3.3 | Representação matemática da lógica difusa | 29 |
| 3.4 | Representação matemática da função triangular | 30 |
| 3.5 | Representação matemática da função trapezoidal | 30 |
| 3.6 | Representação matemática da função gaussiana | 30 |
| 3.7 | Representação matemática da mistura de duas funções gaussianas | 31 |
| 3.8 | Operação lógica: Interseção | 32 |
| 3.9 | Operação lógica: União | 32 |
| 3.10 | Operação lógica: Complemento | 33 |
| 3.11 | Exemplo regras lógicas | 33 |
| 3.12 | Cálculo do centróide | 35 |
| 3.13 | Premissa regra 1 | 37 |
| 3.14 | Premissa regra 2 | 37 |
| 3.15 | Cálculo média ponderada | 40 |
| 4.1 | Normalização dos valores | 55 |
| 5.1 | Equação - pesos obtidos | 79 |

Lista de Siglas e Acrónimos

| | |
|-------|---|
| AIP | Air Independent Propulsion. |
| AR | A ré. |
| AV | A vante. |
| CCD | Closed Cycle Diesels. |
| EMCS | EletroMagnetic Compatibility System. |
| FOM | First Of Maximum. |
| LOM | Last Of Maximum. |
| LOX | Oxigénio Líquido. |
| MEP | Motor Elétrico Principal. |
| MESMA | Module d’Energie Sous-Marine Autonome. |
| MOM | Mean Of Maximum. |
| NRP | Navio da República Portuguesa. |
| PN | Project Number. |
| SAD | Sistema de Apoio à Decisão. |
| SSG | Attack Guided Missile Submarine - conventional powered. |
| U | Unterseeboot (German: submarine). |
| USS | United States Ship. |

Introdução

Os submarinos são plataformas altamente eficazes, albergando em si uma capacidade furtiva acima da média, o que lhes garante uma grande vantagem estratégica relativamente aos outros meios navais.

No caso dos submarinos diesel-elétricos, como é o caso dos submarinos portugueses, a sua capacidade furtiva é de certa forma comprometida, pois estes precisam de navegar à cota periscópica com frequência para recarregar as suas baterias, o que os expõe ao seus oponentes.

Dadas as constantes alterações e melhorias nas capacidades dos equipamentos de bordo, torna-se necessário que a esquadra da Marinha acompanhe essas evoluções. É neste âmbito que, no que respeita aos submarinos convencionais, que os sistemas independentes do ar, também conhecidos como sistemas AIP - *Air Independent Propulsion*, têm um papel bastante importante. Estes sistemas utilizados autonomamente, ou seja, sem serem complementados pelos geradores, permitem aumentar a autonomia em imersão dos submarinos, em pelo menos, 14 dias a baixas velocidades de operação. Assim, os submarinos convencionais aproximam-se, de certa forma, ainda que um pouco distantes, aos submarinos nucleares no que toca à capacidade de navegação em imersão elétrica.

Dito isto, o objetivo principal deste estudo, é a criação de um sistema inteligente baseado em lógica difusa, que auxilie na tomada de decisão acerca de qual o sistema mais adequado a implantar nos submarinos da Marinha Portuguesa no futuro, cumprindo com os requisitos e necessidades da Armada. Recorre-se ainda à validação do modelo, através da verificação de crescimento dos valores da recomendação fixando qualquer uma das três dimensões utilizadas (operacional, económica e ambiental) e aumentando as outras não fixas.

Objetivos da dissertação

Este tema tem como principal objetivo a criação de um sistema que auxilie na tomada de decisão sobre qual o melhor sistema AIP a adotar, tendo em conta as características mais importantes e significativas de cada sistema (ruído, custos, etc.). Desta forma, é possível delinear uma estratégia a médio/longo prazo que permita uma adaptação dos sistemas de propulsão nos submarinos portugueses, de forma mais eficiente e eficaz.

Pertinência do Tema

Este tema de dissertação surge da conveniência de melhoramento da esquadra, através de novas ideias, soluções inovadoras e, de certa forma, aproveitando os desenvolvimentos das tecnologias. Utilizando tudo o que foi referido anteriormente, contribui inequivocamente para a melhoria da capacidade de dissuasão no mar e, dessa forma, permite o cumprimento da missão da Marinha.

Para o efeito, pretende-se recorrer a ferramentas modernas e fiáveis, consubstanciadas num sistema que apoie na decisão, de quais os sistemas AIP que ajudam a maximizar a autonomia dos submarinos em imersão elétrica, sem recurso ao *snorkel*, condição fundamental para a sua descrição e sucesso no cumprimento da missão.

De modo resumido, esta dissertação promove o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão, cuja aplicabilidade não se cinge apenas a sistemas AIP. Ou seja, aproveita este exemplo para demonstrar a utilidade da própria ferramenta, visto que esta engloba uma gama de aplicações que abrange todo e qualquer sistema que se queira instalar a bordo de qualquer navio.

Por outro lado, sendo os sistemas AIP ainda relativamente jovens, a fiabilidade dos mesmos a médio e longo prazo é bastante inferior a outros sistemas mais desenvolvidos, sendo o seu tempo de vida também algo inferior, pelo que será expectável a necessidade de renovar ou até substituir o sistema em uso, durante o ciclo de vida dos navios. Esta necessidade torna-se mais evidente quando se verifica um crescimento significativo do tempo de vida útil das plataformas (navios), que acentua a necessidade de efetuar atualizações a muitos dos sistemas e equipamentos.

No caso da Marinha Portuguesa, o sistema AIP de células de combustível tem vindo a apresentar alguns sintomas da sua juventude, tendo os módulos e demais componentes já mais de 10 anos de serviço, com a consequente necessidade de

manutenção extensiva. Ademais, findo o segundo ciclo operacional dos navios, que no caso do NRP *Tridente* já decorre em cerca de um quarto, afigura-se que terá que ser equacionado um *midlife upgrade*, por via do tempo de vida decorrido dos sistemas, e das células de combustível em particular, mas também pela necessária gestão da obsolescência dos equipamentos. Assim, num futuro próximo, é possível que tenha que ser avaliada a condição do próprio sistema de células de combustível, e equacionada a substituição de alguns dos seus componentes, no mínimo.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação de mestrado é dividida em sete partes. Na **Introdução**, é dada uma pequena explicação da escolha do tema escolhido, os seus objetivos, a pertinência do mesmo e, por fim, a estrutura da dissertação.

No **Capítulo I - Estado da arte e conceitos teóricos**, consiste na revisão da literatura e na análise do estado de arte sobre o tema.

Relativamente ao **Capítulo II - Sistemas adjacentes**, este consiste sobretudo na apresentação dos quatro sistemas AIP existentes, sendo aqui explanadas as suas características, o seu funcionamento base e os seus prós e contras.

De seguida, no **Capítulo III - Lógica Difusa**, são referidos os conceitos teóricos por detrás da lógica difusa, e explanados os métodos utilizados na elaboração da ferramenta de apoio à decisão.

No **Capítulo IV - Desenvolvimento do sistema de apoio à decisão**, é feita a explicação de todos os passos efetuados para a construção da ferramenta.

Seguidamente, no **Capítulo V - Aplicação do Sistema e Discussão dos Resultados Obtidos**, é elaborada a recolha e tratamento dos dados de entrada, de modo a criar a base de dados de trabalho e é realizada a discussão e análise dos resultados obtidos, retirando as conclusões necessárias.

Por fim, a **Conclusão**, onde nesta última parte, são então elaboradas as considerações finais, onde estão as conclusões retiradas com base nos resultados obtidos, as limitações encontradas na elaboração do mesmo e, por fim, algumas recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 1

Estado da Arte e Conceitos Teóricos

1.1 Introdução

O desconhecido mundo subaquático foi desde sempre motivo de grande curiosidade da humanidade. Muitas foram as tentativas dos nossos antepassados em explorar esse mundo, mas muitas das vezes sem sucesso. Apesar disso, o ser humano nunca desistiu de ir à descoberta. A ideia de navegar em imersão sempre fascinou o ser humano, e muitas foram as pessoas que, ao longo dos anos, tentaram projetar e construir plataformas submersíveis, mas que acabaram por ver o seu sucesso limitado («História do Submarino», 2016).

William Bourne (Gidi, s.d.) e Cornelis Drebbel (BBC, 2014) foram dos primeiros nomes a serem associados à criação do primeiro submarino. Apesar disso, foi somente a partir do século XVIII que foi possível observar desenvolvimentos consideráveis em relação às ideias e projetos criados, nomeadamente o USS *Turtle* e o *Nautilus* («História do Submarino», 2016).

Contudo, os submarinos só tiveram um avanço significativo no século XIX, muito graças à revolução industrial e ao aparecimento da eletricidade (Barreto, 2017, p. 10). Nesta época verificaram-se grandes contributos, com o intuito de desenvolver e conceder mais poderio a estas plataformas, tanto com a criação dos motores de combustão interna, como com o aperfeiçoamento dos motores elétricos («História do Submarino», 2016), sendo que o seu uso foi bastante notório graças ao aparecimento de muitos cenários de guerra («submarino», s.d.).

No seguimento do crescimento e das descobertas realizadas ao longo desses anos, e não obstante do facto de a permanência dos submersíveis em imersão continuar a apresentar-se como uma dificuldade, as forças militares mantiveram o

interesse nesta plataforma (Barreto, 2017). Os submarinos, ainda na qualidade de submersíveis, foram uma arma letal durante a primeira metade da Segunda Guerra Mundial (Fernandes, 2016). Contudo, com o início da utilização do radar pelos Aliados, a operação dos submarinos alemães ficou bastante abalada por passarem a ser detetados a longas distâncias. Foi esta circunstância que promoveu a necessidade da Marinha Alemã incorporar o sistema *snorkel* (três anos antes observado em submarinos capturados aos holandeses) nas suas unidades submarinas, com utilização regular a partir de 1943, permitindo-lhes fugir aos radares dos Aliados e tornar os meios submarinos temíveis novamente durante a fase final da Segunda Guerra Mundial (Ireland, 2003).

Foi nesta altura criada a primeira força de submarinos no mundo, chave da transição dos submersíveis para os submarinos, e génese de uma das armas mais letais existentes nas operações militares navais.

A partir de 1955, começaram a surgir os primeiros submarinos nucleares («História do Submarino», 2016). Esta grande descoberta mudou por completo a sua forma de funcionamento, permitindo uma permanência submersos muito acima do que antes era possível. Aquilo que acabava por ser a autonomia antes da aplicação de motores atômicos nos submarinos, de apenas meros dias, acabou por sofrer uma grande mudança: essa autonomia passou de dias, para muitos meses, que não necessitando de se reabastecer de combustível por certos períodos, podiam mesmo chegar a conseguir permanecer vários anos submersos («História do Submarino», 2016), se não fossem as limitações de outra índole, tais como a resistência humana e a saturação da atmosfera a bordo. Apesar disso, o aspeto mais relevante dos submarinos nucleares passa sobretudo pela desnecessidade de vir à cota periscópica para carregar as baterias (autonomia em imersão elétrica), evitando desta forma cometer indiscrições em termos operacionais.

Hoje em dia, os submarinos são reconhecidos como das unidades operacionais mais complexas no mundo, e uma das plataformas mais dissuasoras e eficazes de uma Força Naval (Azevedo, 2013). A sua descrição permite confundir o adversário, ameaçando estar em qualquer sítio, enquanto poderão estar em sítio nenhum. A baixa velocidade de operação e patrulha permite-lhes grande autonomia. A possibilidade de alterar sistematicamente a cota de operação, conhecendo em permanência e com maior rigor as condições oceanográficas na área de operação, permite-lhe usar em seu favor as águas em que operam.

Tudo isto representa uma grande vantagem estratégica para as Marinhas que possuam submarinos. Quando construídos, tendem a dar resposta às necessidades

operacionais das suas Marinhas, tanto no contexto humano como tecnológico, pelo que os requisitos operacionais decorrem das necessidades estratégicas e militares das respetivas nações. As necessidades específicas das nações definem as capacidades destes meios, concorrendo de certa forma para a tipologia das suas missões operacionais (Bovis, 2016). Apesar disso, e tendo em conta que o ambiente subaquático é um meio muito crítico, onde pequenos erros na operação, ou até mesmo falhas nos equipamentos, são suficientes para causar grandes danos nas plataformas, e que por vezes acabam até por ser fatais para as suas guarnições, torna-se imperativo combinar a tecnologia e experiência, de modo a conseguir minimizar esses incidentes (Bovis, 2016).

Dado os desenvolvimentos e desafios tecnológicos constantes ao longo dos anos, abrem-se portas a novas perspetivas e promessas tecnológicas, que consigam garantir a continuidade no progresso, tanto nos campos da segurança, como no campo da melhoria das capacidades militares. Embora estes tenham ficado conhecidos sobretudo pelas suas aplicações militares, os submarinos também têm sido utilizados em pesquisas oceanográficas, em manutenções de estruturas submarinas e na exploração e recuperação de embarcações naufragadas («submarino», s.d.).

1.2 Submarinos em Portugal: Classe *Tridente*

Portugal tem sob sua jurisdição uma enorme área marítima. Patrulhar uma área tão ampla é bastante exigente, e, por isso e devido à incapacidade de manter uma patrulha efetiva face aos meios navais disponíveis, torna-se de extrema importância implementar uma boa estratégia de dissuasão («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.). Para corresponder a este desafio, é necessário ter uma Marinha maioritariamente oceânica, e isso passa sobretudo pelos meios disponíveis numa Força Naval, nomeadamente os submarinos, os quais albergam em si uma capacidade de condução em operações, sem ser detetados, sendo por isso mesmo considerados meios dissuasores por excelência.

Formaram-se então, em toda a história da Marinha Portuguesa, cinco esquadilhas, tendo havido marcos bastante importantes na sua evolução, nomeadamente aquando da passagem da terceira para a quarta, com o despontar do submarino em substituição do submersível, devido à incorporação do *snorkel*, e aquando da passagem da quarta para a quinta, onde houve um enorme salto no que toca ao desenvolvimento tecnológico, permitindo uma melhoria bastante significativa nas

capacidades operacionais das plataformas, nomeadamente no que respeita à autonomia em imersão.

Em 2009, o NRP *Tridente* e o NRP *Arpão* foram as mais recentes aquisições da Marinha Portuguesa, e que constituem ainda hoje a 5^a Esquadilha, substituindo assim os submarinos da Classe *Albacora*, pertencentes à 4^a Esquadilha. Ambos foram projetados e contruídos no estaleiro alemão HDM Howaldtsweke Deutsche Werft GmbH e pertencem à Classe *Tridente* (Azevedo, 2013).

Por forma a corresponder aos requisitos e exigências operacionais da Marinha Portuguesa, foi necessário efetuar diversas modificações nestes dois submarinos. Estes resultam da combinação de características de dois modelos de submarinos alemães: o “U-209PN” e o “U-214”. A nível de designações, afirma-se que os submarinos portugueses são submarinos do tipo “U-209PN”, mas que se baseiam maioritariamente no modelo “U-214” (Vista, 2010).



FIGURA 1.1: Submarino NRP *Tridente* (2009 - atualmente) (Sá, 2020)

Comparativamente aos anteriores submarinos acima referidos e que fizeram parte das anteriores Esquadilhas nacionais, é bastante notória a sua evolução tecnológica, não só a nível da autonomia e sensores, mas também a nível de meios de salvamento e das próprias condições de habitabilidade.

Na 5^a Esquadilha, é bastante evidente a evolução tecnológica em muitos aspetos. Para além de estes novos submarinos serem muito mais modernos em quase todas as áreas, dispõem de uma capacidade de utilização de sistemas AIP (Air Independent Propulsion). Este sistema de propulsão independente do ar permite aumentar a autonomia dos submarinos em imersão elétrica em cerca de 14 dias, sem

que o submarino tenha necessidade de atingir a cota periscópica para recarregar as suas baterias. Desta forma, torna-se uma plataforma menos suscetível à deteção e aumenta assim o seu poder de dissuasão (Caravana, 2004).

1.3 Principais características da Classe *Tridente*

Os submarinos da Classe *Tridente* englobam em si características bastante próprias da classe, tornando estes navios únicos em todo o mundo. Dadas as suas características singulares, que serão explicadas mais em pormenor nos subcapítulos seguintes, e apesar de somente terem a capacidade de albergar 33 elementos de guarnição, 7 oficiais, 10 sargentos e 16 praças, estes são considerados dos mais avançados submarinos convencionais do mundo («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.).

1.3.1 Características Técnicas da Plataforma

As características gerais dos submarinos pertencentes à 5ª Esquadilha, a nível das suas dimensões e desempenho, são as seguintes:

- Comprimento fora-a-fora: 67,9 metros;
- Comprimento do casco resistente: 52,5 metros;
- Diâmetro do casco resistente: 6,3 metros;
- Boca máxima (leme horizontal AR): 7,65 metros;
- Boca máxima (leme horizontal AV): 6,92 metros;
- Calado médio à superfície: 6,6 metros;
- Altura quilha-torre: 13 metros;
- Deslocamento à superfície: 1842 toneladas;
- Deslocamento em imersão: 2020 toneladas;
- Profundidade máxima operacional: \approx 300 metros;
- Profundidade de colapso: 680 metros;
- Velocidade máxima superfície/submerso/com AIP: 12/20/6 nós;

1.3.2 Configuração da Plataforma

Passando à configuração de funcionamento da plataforma, estes submarinos são essencialmente elétricos. Dispõem de dois polos de armazenamento de energia, as chamadas baterias principais, e, para produção de energia, dispõem de dois grupos eletrogéneos e, em matéria de AIP, dois módulos de células de combustível. Ao nível dos principais consumidores de bordo, é de destacar o motor principal. Apesar de fisicamente este se apresentar como um único motor, na realidade, e eletricamente falando, existem dois semi-motores independentes que podem funcionar isoladamente («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.).

Como podemos verificar na Figura 1.2, estes submarinos dispõem de um quadro elétrico principal com duas secções diferentes, mas que se podem interligar por meio de disjuntores, sendo que a estes estão ligados todos os outros equipamentos anteriormente referidos. À semelhança de muitos navios de guerra, também nestes é adotada uma filosofia de redundância. Desta forma é possível garantir que, caso ocorra uma anomalia severa numa das secções ou num dos equipamentos, a outra metade não é afetada, pelo que o navio consegue prosseguir com a sua missão, sem impacto significativo nas suas capacidades operacionais («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.).

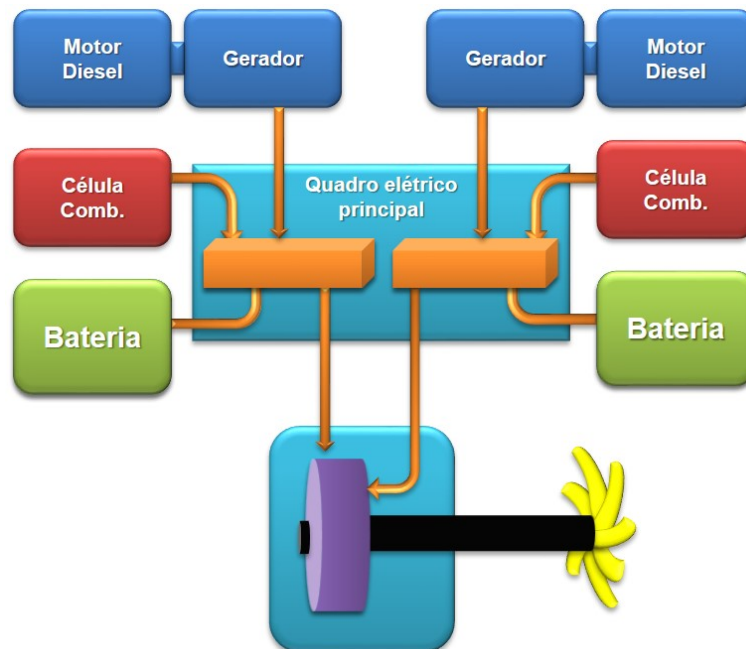


FIGURA 1.2: Esquema sistema elétrico dos submarinos da Classe *Tridente* («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.)

1.3.3 Armazenamento e produção de energia

Relativamente ao armazenamento de energia, este é feito recorrendo às duas baterias principais, como referido anteriormente. Cada uma dispõe de 324 elementos, com uma capacidade nominal de 9600 Ah, instalados nos respetivos porões («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.), como é ilustrado na Figura 1.3.

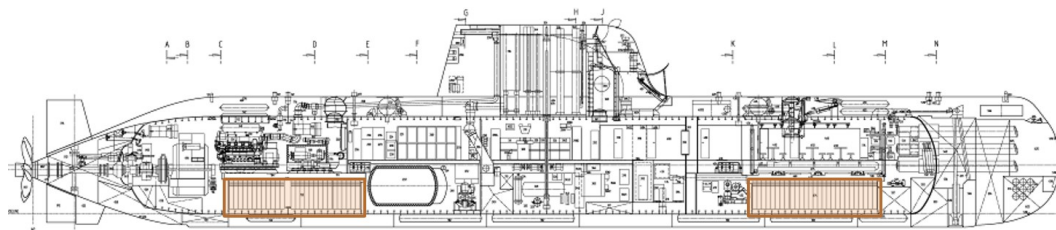


FIGURA 1.3: Porões de armazenamento das baterias («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.)

Estas baterias são fabricadas na Grécia, e a tecnologia empregue é a de ácido-chumbo. Englobam ainda sistemas auxiliares, de arrefecimento, monitorização e eliminação do hidrogénio produzido. Dadas as grandes dimensões das baterias, é produzida uma grande quantidade de hidrogénio, especialmente durante a carga. E, sendo que o hidrogénio é um gás extremamente explosivo em concentrações a partir dos 4%, os navios têm que estar equipados com um bom sistema de eliminação, que é o que acontece no caso dos submarinos («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.). Este sistema depende sobretudo da ventilação eficaz e permanente dos porões das baterias.

No caso da produção de energia, a sua principal fonte é constituída por dois grupos eletrogéneos, motor a diesel e gerador síncrono acoplados diretamente. A potência máxima atingida por grupo é de cerca de 970 kW, sendo que por projeto foi mantida uma reserva de potência de 70 kW no motor diesel, por critérios de segurança e fiabilidade («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.). De realçar ainda que os submarinos contêm uma capacidade de operar os grupos eletrogéneos quer à superfície quer em imersão, recorrendo para o efeito ao mastro *snorkel*, para a admissão de ar, e a condutas e sistema de evacuação particulares para evitar uma contrapressão nos gases de evacuação excessiva. Finalmente, e por se tratar de um submarino, onde a regulação do peso é fator bastante importante e de permanente preocupação em imersão, que permite garantir a flutuabilidade neutra do navio, os tanques de combustível nunca ficam vazios, sendo preenchidos com água do mar à medida que o gasóleo é consumido.

Ainda na produção de energia, existem também as células de combustível, um sistema inovador que representa um salto significativo no impacto que tem na exploração operacional do navio, por não ter necessidade de navegar à cota periscópica, com utilização do *snorkel*, para produzir energia, possibilitando incrementar a autonomia em imersão sem a necessidade de recorrer aos grupos eletrogêneos e, consequentemente, de se expor ao adversário («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.).

Os módulos das células de combustível foram concebidos e fabricados pela *Siemens* (empresa alemã), apresentando uma potência nominal de 120 kW cada. Ao nível dos sistemas auxiliares às células de combustível, estes foram concebidos pelos estaleiros que construíram os navios, neste caso pelo estaleiro alemão HDW Howaldtsweke Deutsche Werft GmbH («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.). Na figura 1.4, é possível observar uma ilustração onde se pode verificar que, apesar de os módulos das células de combustível serem o cerne do sistema, apenas representam um volume diminuto quando comparados com a restante instalação.

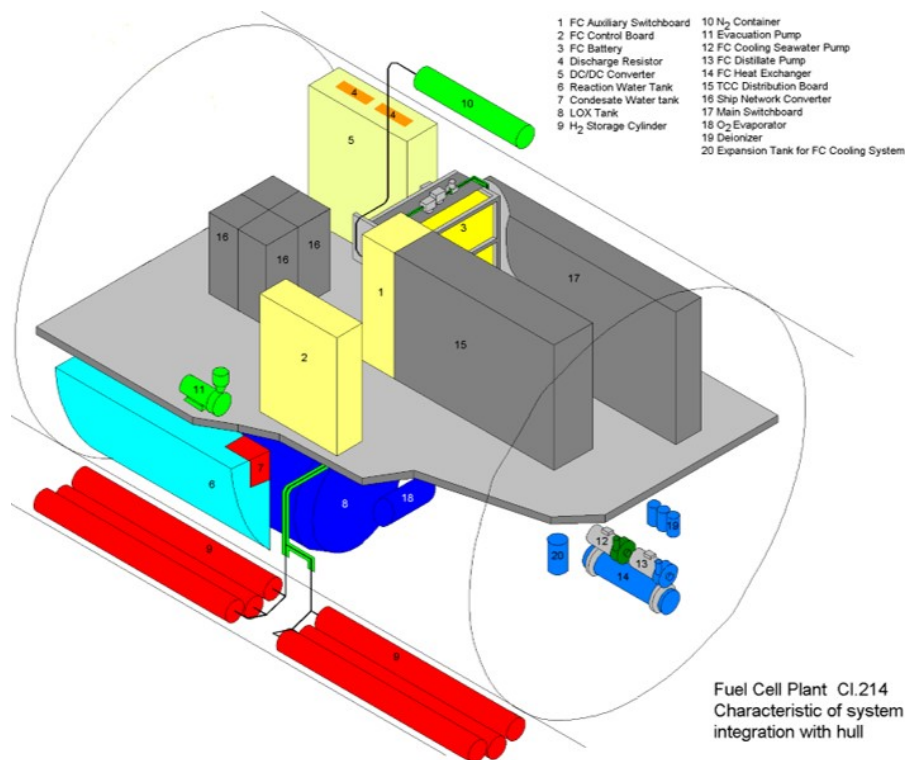


FIGURA 1.4: Esquema dos módulos das células de combustível e sistemas auxiliares («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.).

Dada a sua complexidade e à enorme quantidade de sistemas afetos à plataforma, tornou-se completamente indispensável dotar o navio de um meio através do qual consiga beneficiar de uma capacidade de monitorizar e controlar esses sistemas, designado por EletroMagnetic Compatibility System («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.). Este sistema permite não só a monitorização e controlo remoto, como efetua também várias rotinas automáticas (regra geral, despoletadas à ordem do operador).

1.3.4 Propulsão

No que toca à propulsão, estes submarinos estão equipados com um motor síncrono de íman permanente, diretamente acoplado à hélice, com uma potência superior a 4 MW, e que representa também um avanço tecnológico bastante significativo («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.). É de referir também que as características das hélices permitem reduzir a cavitação e, por conseguinte, o nível de ruído da propulsão.

O seu sistema de propulsão é efetivamente um sistema elétrico, constituído por um motor elétrico principal (MEP) e por dois sistemas de produção elétrica, nomeadamente por um sistema de propulsão independente do ar (AIP) e por um sistema diesel. Relativamente ao sistema a diesel, este é constituído pelos dois grupos eletrogéneos e pelas baterias. Os geradores dispõem da capacidade de recarga das baterias do submarino que, por sua vez, alimentam o motor propulsor. Este motor por sua vez, utiliza a energia elétrica adquirida das baterias e transforma-a em energia mecânica, que é utilizada na propulsão do submarino.

1.3.5 Autonomia

Em matéria de autonomia, esta está diretamente relacionada com as velocidades adotadas durante os a navegação. Quanto menor for a velocidade praticada, menor irá ser a descarga das suas baterias, pelo que o nível de consumo de energia também será mais baixo. E o contrário também se aplica, quanto mais altas forem as velocidades praticadas, maior será a descarga das baterias e, consequentemente, mais energia será gasta. Nos submarinos da classe *Tridente*, a autonomia em imersão elétrica (sem recurso aos grupos eletrogéneos) decorre da elevada capacidade da bateria principal, ao que acrescem 14 dias a baixa velocidade provenientes das células de combustível («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.).

Capítulo 2

Sistemas Adjacentes

A nível militar, a eficácia das operações dos submarinos depende sobretudo, da sua habilidade em operar de forma *stealth* e independente. Diversos estudos pelo mundo têm vindo a tentar desenvolver técnicas que permitam, não só reduzir a detetabilidade dos submarinos diesel-elétricos, como também melhorar e aumentar a sua autonomia (Tupper e Rawson, 2001).

Para um submarino convencional (diesel-elétrico), a sua maior desvantagem, relativamente aos submarinos nucleares, é a menor capacidade de permanecer submerso por longos períodos, cometendo indiscrições ao expor os mastros para obter o ar necessário para operar os geradores a diesel de bordo e, assim, recarregar as suas baterias. Ao efetuar essa recarga, para além da suscetibilidade à deteção visual e radar devido à exposição de mastros, os geradores a diesel emitem gases de escape a altas temperaturas e bastante ruído, o que contribui para a vulnerabilidade do submarino a nível da deteção térmica e acústica.

Em inícios do século XXI, os submarinos convencionais representavam, e ainda representam, quase 2/3 da frota de submarinos existentes no mundo (Bovis, 2016). Hoje em dia, a geração de energia utilizando sistemas de produção anaeróbicos, que se acredita terem ainda um elevado potencial de evolução, pode contribuir de forma significativa para maximizar a imersão dos submarinos não-nucleares (Tupper e Rawson, 2001). Debaixo de água, só utilizando baterias, um submarino convencional é uma arma formidável, extremamente silenciosa, capaz de operar em zonas confinadas e em águas profundas, contendo, também em si, capacidades ofensiva e defensiva capazes de fazer frente aos submarinos nucleares.

Para melhorar a sua capacidade furtiva, os submarinos convencionais necessitam de maximizar a capacidade de permanecer submersos durante longos períodos de tempo. Para que isso seja realizável, todo o processo passa por reduzir consumos de energia, melhorar a capacidade das baterias ou instalar sistemas AIP que

possam providenciar, parcialmente ou totalmente, o poder propulsor enquanto este está submerso.

No âmbito dos sistemas AIP, as células de combustível, os motores de ciclo de Stirling, as turbinas a vapor de circuito fechado e os motores a diesel de circuito fechado (Closed Cycle Diesels) são, atualmente, os sistemas mais comumente utilizados e têm vindo a evoluir de forma bastante significativa (Bovis, 2016). A história da criação destes sistemas AIP e o seu respetivo funcionamento, serão abordados nos subcapítulos seguintes.

2.1 Células de Combustível

Apesar de as células de combustível estarem associadas às tecnologias mais modernas, a sua origem remonta a meados do século XIX (Spiegel, 2017). Em meados dos anos 80, estas acabaram por ser objeto de estudos mais intensos por parte da “HDW Shipyard”, juntamente com a *Siemens*. Estes acabaram por desenvolver e adaptar as células de combustível aos submarinos, pelo que levaram a cabo testes a um protótipo no submarino U-1, em 1988 («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.). Muitos outros projetos se seguiram, nomeadamente a criação de novas classes de submarinos com estes sistemas já incorporados, nomeadamente nos submarinos da classe U-212 solicitadas pelas Marinhas Alemã e Italiana; da classe U-214, exportada para a Grécia e Coreia do Sul; da classe U-209PN vendida a Portugal, entre outros. Houve também a incorporação em submarinos convencionais já ao serviço, como os casos do 209 da Marinha Grega e os *Dolphin* da Marinha Israelita («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», s.d.).

Sendo esta tecnologia bastante recente, esta continua em desenvolvimento, e acredita-se que está ainda longe de atingir o seu desempenho máximo. Independentemente da escolha do combustível, estas representam uma alternativa eficiente para a conversão de energia no futuro, em alternativa aos combustíveis fósseis.

Os maiores desenvolvimentos têm vindo a ser feitos ao nível das reações químicas, por forma a converter mais eficientemente o combustível em energia elétrica, ao nível da durabilidade dos equipamentos e do preço de produção (Correia, 2007). Para além disso, tem havido também grandes desenvolvimentos no que toca aos combustíveis. O recurso a hidrogénio (H_2) com elevado grau de pureza é caro, tanto pela sua produção como pelo seu armazenamento (of Energy, s.d.), sendo que, de forma a combater esse inconveniente, têm sido estudados muitos combustíveis e soluções alternativas.

2.1.1 Princípios base das células de combustível

Em teoria, estas células não passam de aparelhos eletroquímicos, que convertem diretamente energia química proveniente da combinação de um combustível e um oxidante, nomeadamente hidrogénio (H_2) e oxigénio (O_2), em energia elétrica, através de processos que envolvem essencialmente um sistema elétrodo/eletrólito (Kordesch e Simader, 1996)(Barbir, 2013). No entanto, estas células utilizam H_2 puro, o que representa um enorme desafio em termos de armazenamento a bordo (of Energy, s.d.)(Harper, 2008). Para fazer frente a esse grande obstáculo, atualmente existem duas grandes soluções: o armazenamento por absorção em meio sólido (utilizado pelos submarinos da Classe *Tridente*) e o armazenamento no estado líquido (a temperaturas criogénicas).

Relativamente aos componentes base que fazem parte da constituição das células de combustível, são eles:

- Elétrodo – Terminal elétrico que conduz a corrente elétrica numa célula eletroquímica;
- Eletrólito – Um elemento químico que conduz os iões de um elétrodo para outro dentro da própria célula;
- Agentes oxidantes – elemento químico que é reduzido durante o processo, que permite a oxidação ¹;
- Agentes redutores - elemento químico que é oxidado durante o processo, que permite a redução ²;
- Ânodo – Elétrodo onde ocorre a reação de formação de eletrões, ou seja, onde se dá a reação de oxidação. Durante a eletrólise, os aniões ³ movem-se para o ânodo (elétrodo positivo);
- Cátodo – elétrodo para onde se deslocam os eletrões, ou seja, onde ocorre a redução. Durante a eletrólise, os catiões ⁴ movem-se para o cátodo (elétrodo negativo);
- Catalisador – Substância que causa ou acelera a reação química sem ser afetado.

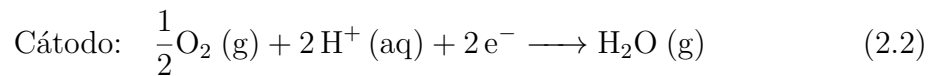
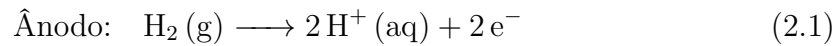
¹Reação na qual há uma perda de eletrões.

²Reação na qual há um ganho de eletrões.

³Ião carregado negativamente

⁴Ião carregado positivamente

Quando o combustível (H_2) e o oxidante (O_2) são introduzidos na célula de combustível, estes reagem entre si na presença de um eletrólito, dando origem a água, calor e energia elétrica. A energia elétrica é conduzida, e dependendo do sistema exterior, ou é armazenada (baterias) ou é imediatamente consumida, enquanto, tanto o calor como a água são eliminados (Revankar e Majumdar, 2014). Por forma a explicar sucintamente todo este processo, as reações que se obtêm tanto no ânodo como no cátodo, são respetivamente:



Analisando em detalhe o que acontece nesta célula de combustível, o H_2 é oxidado no catalisador, produzindo dois eletrões e dois protões de hidrogénio, $2H^+$. Esses eletrões por sua vez são transportados através de um circuito elétrico e são utilizados para produzir uma corrente contínua, enquanto os protões são transportados para o cátodo, através do eletrólito. No cátodo, o O_2 reage com os protões transportados do ânodo e com os eletrões provenientes do circuito elétrico, dando origem ao vapor de água (subproduto).

2.1.2 Vantagens e Desvantagens

As células de combustível são sem dúvida os sistemas emergentes quando nos referimos a sistemas AIP. Estas apresentam diversas vantagens, nomeadamente a sua alta eficiência, o seu elevado grau de furtividade (*stealth*) proveniente da sua baixa assinatura acústica e térmica, os seus subprodutos inócuos (água destilada e calor) que são de fácil gestão e sem impacto ambiental, e o uso de O_2 medicinal como comburente, pois este é bastante comum, fácil de gerir e com duplo uso, na medida em que permite manter o nível de O_2 no interior do submarino em imersão.

Apesar disso, estas apresentam ainda algumas desvantagens bastante relevantes. Para além de estas ostentarem uma baixa potência, o seu custo de aquisição e manutenção é também bastante elevado.

De referir ainda que estas requerem a utilização de H_2 puro, o que acarreta encargos ao nível do custo extremamente elevados. O seu acesso fora do mundo ocidental e industrializado é deveras limitado, e obriga à existência de sistemas de armazenamento e gestão complexos e onerosos (of Energy, s.d.).

Outra grande desvantagem que este sistema apresenta é a sua alta complexidade. Esta depende sobretudo de pontos chave, como é o caso do grau da pureza dos fluídos utilizados, da necessidade de controlar com elevada precisão a reação química no interior das células, entre outros.

Deste modo, é possível perceber que os fatores atrás mencionados inviabilizam o controlo manual e obrigam à utilização a sistemas complexos de monitorização, controlo e automação, quer para as células propriamente ditas, quer para os sistemas auxiliares (comburente, combustível, arrefecimento, extração de subproduto, etc.), quer ainda para conversão da energia elétrica produzida pelas células.

Tomando como exemplo os *Attack Guided Missile Submarine - convencional powered*(SSG) da Classe *Tridente*, a nível de autonomia, as células de combustível acrescentam cerca de 2 semanas em imersão elétrica em modo de patrulha silenciosa, praticando velocidades médias até 6 nós («Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos», [s.d.](#)). No entanto, é importante referir que esta autonomia depende não só do método utilizado para gerar energia, mas também da capacidade de armazenamento, bem como das necessidades energéticas do navio.

De forma resumida, a tabela [2.1](#) apresenta as principais vantagens e desvantagens deste sistema.

| Células de combustível | |
|--|--|
| Vantagens | Desvantagens |
| <ul style="list-style-type: none">- Alta eficiência- Baixa assinatura acústica- Baixa assinatura térmica- Subprodutos | <ul style="list-style-type: none">- Baixa potência- Alto custo de aquisição- Alto custo de manutenção- Utilização de H_2 puro- Complexidade |

TABELA 2.1: Vantagens e desvantagens - Células de combustível

2.2 Motores de ciclo Stirling

Os motores de ciclo de Stirling foram inventados em princípios do século XIX, mais precisamente em 1816, por Robert Stirling (Maier et al., [2007](#)). Apesar do seu sucesso inicial, em meados/finais do século XIX, o seu desenvolvimento acabou por ser severamente prejudicado, dado o rápido desenvolvimento dos motores de combustão interna e do aparecimento dos primeiros motores elétricos (Gelu, [2014](#)). Apesar disso, em finais do século XIX, graças à crise dos combustíveis e à crescente

preocupação ambiental por parte da comunidade científica, despoletou novamente o interesse no desenvolvimento dos motores de ciclo de Stirling (Ashaghi et al., 2012).

Com o desenvolvimento do conhecimento matemático e o aprimoramento tecnológico, tornou possível o aumento da eficiência destes motores e o decréscimo do seu preço. As vantagens que este sistema começava a apresentar eram enormes, pois para além do preço e eficiência, estes beneficiavam de outras, nomeadamente a facilidade que apresentava na sua construção, o seu baixo ruído, entre muitos outros; o que acabou por atrair muitos países (Gelu, 2014).

Por volta dos anos 80 do século XX, a Suécia acabou por ser o país pioneiro em desenvolver e implementar este sistema nos seus submarinos, nomeadamente nos submarinos *Gotland* e *Nacken*. A França, Singapura, China e Japão seguiram-se, implementando esse mesmo sistema em algumas das suas classes de submarinos (Bovis, 2016).

2.2.1 Funcionamento dos motores de ciclo de Stirling

Os motores de ciclo de Stirling são motores de ciclo fechado, cujo fluído de trabalho (gás) é sujeito a um aquecimento e arrefecimento constante por parte de fontes externas, o que despoleta a sua expansão e contração cíclica, devido ao diferencial de temperatura a que é exposto (Menon et al., 2020) (Thornton, 1994).

Deste modo, o funcionamento deste ciclo pode ser traduzido por um diagrama P-V, apresentado na figura seguinte:

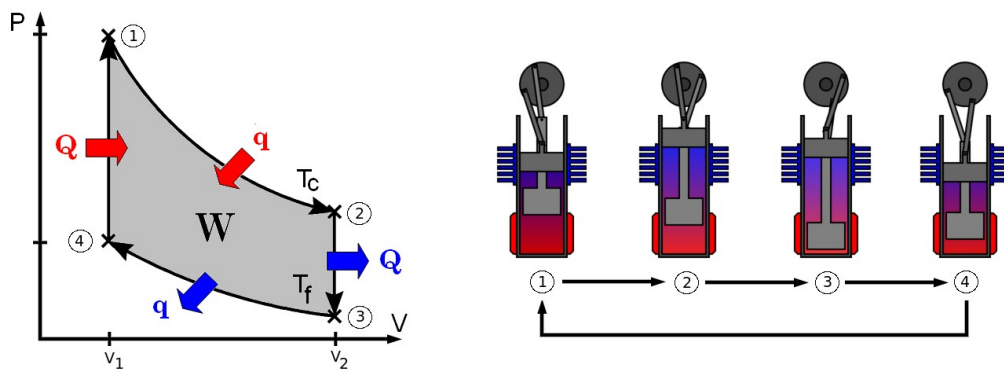


FIGURA 2.1: Diagrama P-V do ciclo de Stirling («Motor Stirling», s.d.)

Pelo diagrama apresentado, torna-se bastante intuitivo perceber que o funcionamento deste ciclo é baseado sobretudo em quatro processos termodinâmicos distintos que atuam sobre o gás. Esses processos são os seguintes:

- 1-2 – Expansão isotérmica: neste processo, o sistema (a temperatura constante) sofre um aumento do seu volume ($V_1 < V_2$), que por sua vez faz diminuir a pressão no interior dos módulos ($P_1 > P_2$). É nesta etapa que se extrai trabalho;
- 2-3 – Arrefecimento a volume constante: aqui existe perda de calor, o que desencadeia uma diminuição da temperatura e de pressão. Contudo, o calor que é libertado neste processo, é reaproveitado para o processo de aquecimento (4-1);
- 3-4 – Compressão isotérmica: neste processo, o gás, a temperatura constante, é comprimido, ocupando assim menos volume no módulo ($V_3 > V_4$), o que por sua vez desencadeia o aumento de pressão entre as partículas;
- 4-1 – Aquecimento a volume constante: neste processo, o gás é aquecido, a volume constante, havendo por isso um aumento da pressão e da temperatura.

2.2.2 Vantagens e Desvantagens

Este é um sistema que já tem dado provas de grande sucesso. As suas grandes vantagens passam sobretudo pela sua baixa assinatura acústica, pela facilidade de aquisição do seu combustível (diesel), sendo bastante benéfico ao nível do seu custo, e pela facilidade de aquisição do próprio sistema.

Contudo, os motores de ciclo de Stirling também apresentam algumas desvantagens. São sistemas bastante volumosos, muito maiores que os módulos das células de combustível, no entanto se considerarmos o sistema completo, não acarretam tanto espaço, pois estas obrigam ao acrescento dos sistemas auxiliares associados. De referir ainda que este sistema passa por grandes desafios tecnológicos, principalmente no que toca aos processos de fabrico dos motores, o que acaba por ser bastante dispendioso. Estes necessitam também de bastante manutenção (menor que nas células de combustível), devido à corrosão gerada muitas vezes pelas altas pressões. Este sistema apresenta também uma baixa eficiência e uma baixa potência. No caso do subproduto resultante da reação entre o combustível e o comburente, os gases de evacuação, necessitam de ser expelidos para a água do mar, o que se revela também uma desvantagem.

Apesar de todas estas desvantagens, os submarinos que têm este tipo de sistemas AIP instalados (tomando como exemplo os submarinos suecos) usufruem de

cerca de 14 dias em imersão elétrica a baixas velocidades, o que acaba por se equiparar à autonomia dos SSG tipo 214 de construção alemã, e constitui um incremento bastante significativo na capacidade furtiva destas plataformas.

De forma resumida, a tabela 2.2 apresenta as principais vantagens e desvantagens deste sistema.

| Motores de ciclo de Stirling | |
|---|---|
| Vantagens | Desvantagens |
| <ul style="list-style-type: none"> - Combustível <i>standart</i> - Baixa assinatura acústica - Fácil aquisição | <ul style="list-style-type: none"> - Baixa eficiência - Baixa potência - Alta necessidade de manutenção - Subprodutos |

TABELA 2.2: Vantagens e desvantagens - Motores Stirling

2.3 Turbinas a vapor de ciclo fechado

A criação das turbinas a vapor remonta a 1883, com a construção da primeira turbina por parte Carl Gustaf de Laval, engenheiro sueco («turbinas a vapor», s.d.). Após a sua criação, muitos foram os cientistas que estiveram dispostos a desenvolver esse modelo por forma a torná-lo mais eficiente. A contribuição de diversos estudos, deu um grande impulso às turbinas, tornando-as mais simples e menos dispendiosas. Embora inventada e conhecida há alguns séculos, o seu grande desenvolvimento e aplicação prática só se deu nas últimas décadas.

Atualmente, esta máquina é utilizada principalmente em centrais elétricas, mas também tem muitas outras aplicações igualmente importantes. O sistema MESMA (*Module d'Energie Sous-Marine Autonome* / Módulo de Energia Submarina Autónoma), cuja origem remonta aos anos 80 do século XX, é um exemplo disso. Este é um sistema francês baseado num sistema de turbinas a vapor de ciclo fechado, que utiliza como fonte de energia a combustão do etanol e do oxigénio, e que é atualmente adotado apenas por 3 submarinos da Classe *Agosta 90B*, da Marinha Paquistanesa. Uma segunda versão deste mesmo sistema, que opera com uma mistura de diesel-oxigénio, está ainda a ser testado em laboratório (Bovis, 2016).

2.3.1 Funcionamento das turbinas a Vapor de Ciclo Fechado

Enquanto nos submarinos nucleares, os reatores fornecem o calor para converter água em vapor, os submarinos convencionais equipados com turbinas a vapor

de ciclo fechado, utilizam uma fonte de energia não nuclear para efetuar o mesmo (Bovis, 2016).

Estas são máquinas térmicas cujo funcionamento se baseia no ciclo de Rankine (Thornton, 1994), e que transformam energia contida no vapor sob a forma de pressão, velocidade e temperatura, em trabalho mecânico (Kerros et al., 1994)(Mennon et al., 2020). Isto acontece devido ao aquecimento da água numa caldeira (mantendo a pressão constante), transformando-a em vapor. Por sua vez, esse vapor é encaminhado para as turbinas, onde é extraído trabalho (transformando assim a energia cinética em energia mecânica). Isto é um processo isentrópico e há uma diminuição de pressão e temperatura. Depois de passar na turbina, o vapor é encaminhado para um condensador, transformando todo o vapor em água no estado líquido (aqui, a pressão é a mesma que nas turbinas). Dada essa razão, e para que a água seja enviada para a caldeira, é necessário o aumento da pressão, pelo que por essa razão, antes de retornar à caldeira, esta passa por uma bomba (de maneira a que a água esteja à mesma pressão que a caldeira). Retoma-se assim o ciclo.

2.3.2 Vantagens e Desvantagens

A alta potência que é capaz de produzir, é uma das grandes vantagens deste sistema comparativamente a todos os outros, pois desta forma permite a que os submarinos consigam atingir velocidades muito mais elevadas em imersão elétrica ou a carregar as baterias.

No entanto, este sistema possui várias desvantagens. Para além de ser um sistema bastante complexo, este contém ainda uma eficiência bastante baixa. Além disso, este sistema envolve ainda uma taxa de consumo de oxigénio bastante elevada e um ruído também bastante elevado.

Ao nível da sua aquisição, instalação e manutenção, é importante referir que este sistema é bastante dispendioso (custos na mesma ordem de grandeza ou superior às células de combustível) tanto na sua aquisição como na sua manutenção, e bastante volumoso, sendo por isso necessário a sua inserção numa área específica do submarino, o que alberga uma necessidade de reestruturação e modernização do mesmo.

Contudo, apesar de todas estas desvantagens, os submarinos que têm o sistema MESMA implantado, beneficiam de cerca de 18 dias em imersão elétrica, podendo atingir os 21 dias, dependendo das velocidades praticadas.

De forma resumida, na tabela 2.3 são apresentadas as vantagens e desvantagens deste sistema.

| Turbinas a Vapor de Ciclo Fechado | |
|-----------------------------------|---|
| Vantagens | Desvantagens |
| - Alta Potência | - Baixa eficiência - Assinatura acústica elevada - Alto custo de manutenção - Alto custo de aquisição - Subprodutos |

TABELA 2.3: Vantagens e desvantagens - Turbinas a vapor

2.4 Motores a Diesel de Circuito Fechado

Os motores a diesel foram, e têm sido muito investigados como um possível método de melhorar a autonomia dos submarinos em imersão elétrica, baseando-se sobretudo na possível adaptação desses motores ao ambiente operacional subaquático. Porém, essas investigações só tiveram algum relevo durante e, após a Segunda Guerra Mundial, onde a Rússia foi o país pioneiro que, não só desenvolveu o primeiro sistema de motores a diesel de circuito fechado (CCD), como o implementou experimentalmente num submarino em 1940. Após a Segunda Guerra Mundial, a Rússia implementou também esse sistema nos seus submarinos da Classe *Quebec* (Dingemanse, 2019).

Apesar das muitas experiências efetuadas por parte de grandes potências mundiais, atualmente não existe nenhum submarino operacional no mundo com este sistema AIP implementado (Bovis, 2016).

2.4.1 Funcionamento dos Motores a Diesel de Circuito Fechado

Os motores a diesel de circuito fechado são sistemas que incorporam motores a diesel padrão, cuja operação depende da utilização de “ar sintetizado”, ou seja, recorrendo à utilização do O_2 líquido (LOX) armazenado a bordo, árgon (Ar) e outros produtos de exaustão reciclados (Dingemanse, 2019).

Estes elementos que estão armazenados a bordo, são injetados na câmara de combustão juntamente com o diesel. Ao reagirem, dão origem aos gases de escape (CO_2 , azoto (N_2) e vapor de água), que acabam por ser reaproveitados por forma a extrair todo o O_2 e combustível restantes, para que possam ser novamente utilizados

para combustão. O que não é aproveitado acaba por ser misturado com a água do mar e é expelido.

Deste modo, é possível traduzir o funcionamento do ciclo Diesel através de um diagrama P-V, apresentado na figura seguinte:

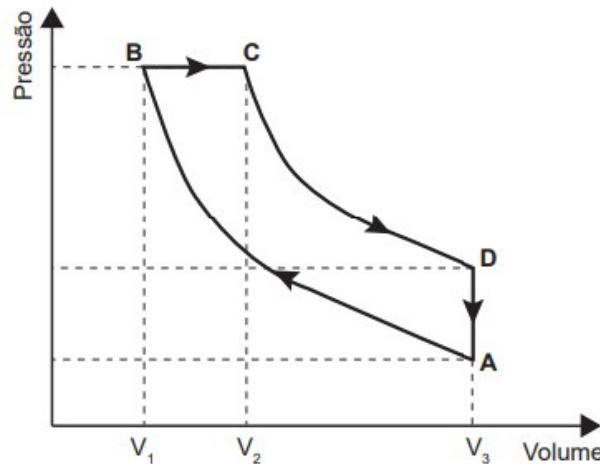


FIGURA 2.2: Diagrama P-V do ciclo Diesel («Questão 121», 2017)

Pelo diagrama apresentado, torna-se bastante intuitivo perceber que o funcionamento deste ciclo é baseado em quatro processos termodinâmicos distintos. São eles:

- A - B – Compressão isentrópica: neste processo, o sistema sofre um aumento de pressão ($P_A < P_B$) devido à redução de volume a que o fluido de trabalho é exposto ($V_A > V_B$);
- B - C – Aquecimento e expansão a pressão constante: aqui, ocorre o aquecimento do sistema, onde despoleta um aumento do volume ($V_B < V_C$), pelo que a pressão se mantém constante. É neste processo que se injeta o combustível;
- C - D – Expansão isentrópica: neste processo, existe um aumento de volume, o que desencadeia no sistema, uma redução na pressão;
- D - A – Arrefecimento a volume constante: para finalizar, o gás é arrefecido, a volume constante, havendo por isso uma diminuição da pressão e respetiva temperatura (há libertação de calor).

2.4.2 Vantagens e Desvantagens

Os motores a diesel de circuito fechado acabam por ter um custo muito mais baixo comparativamente a todos os outros sistemas, tanto ao nível de aquisição como de instalação. O combustível utilizado, diesel, também ajuda bastante ao nível do custo associado.

Quanto à sua eficiência, esta acaba por ser baixa. Em termos de potências, este sistema é inferior ao sistema MESMA, contudo acaba por se superiorizar aos outros dois sistemas (motores de ciclo de Stirling e células de combustível). De realçar ainda que este contém uma assinatura acústica e térmica bastante elevada.

Relativamente à autonomia de que este sistema dispõe e, tendo em conta que não existe atualmente nenhum submarino com este sistema implantado, apenas podemos concluir que a sua autonomia dependerá sempre da sua instalação e da sua capacidade de armazenamento de combustível e comburente. Sendo que normalmente os fabricantes procuram um equilíbrio entre o custo, o impacto do navio (dimensão da instalação) e o ganho na taxa de indiscrição (tempo em imersão elétrica), podemos dizer que o seu valor de referência será de 14 dias em patrulha.

De forma resumida, na tabela 2.4 são apresentadas as vantagens e desvantagens deste sistema.

| Motores a Diesel de Circuito Fechado | |
|--|--|
| Vantagens | Desvantagens |
| <ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo de aquisição - Combustível <i>standart</i> - Baixo custo de manutenção | <ul style="list-style-type: none"> - Baixa eficiência - Alta assinatura acústica - Alta assinatura térmica - Subprodutos |

TABELA 2.4: Vantagens e desvantagens - Motores a Diesel

Capítulo 3

Lógica Difusa

3.1 Introdução

Aristóteles foi o grande pioneiro na criação da lógica clássica, baseando o seu raciocínio em premissas (dependentes de regras) e conclusões, que por sua vez, eram somente classificadas como verdadeiras ou falsas, agrupando assim todas e quaisquer possibilidades (Ivanqui, 2005). No entanto, foi possível observar com o passar do tempo, que muitas das experiências/decisões humanas não podiam ser somente classificadas dessa forma. Com o surgimento das teorias da probabilidade e dos conjuntos difusos, foi possível tornar a classificação mais próxima do pensamento humano, colmatando, de alguma forma, os diversos graus de incerteza e muitas das imprecisões existentes.

Em 1965, Lotfi A. Zadeh em (Zadeh, 1965a, 1965b) fez pela primeira vez referência à lógica difusa, através da teoria dos conjuntos difusos. Esta tinha como finalidade desenvolver matematicamente processos de aferição de fenómenos que simulavam o pensamento humano na tomada de decisões baseadas em dados qualitativos imprecisos. Entendida como uma ferramenta que explora a tolerância à imprecisão e à incerteza, esta permitiria uma avaliação mais detalhada e gradual dos elementos/objetos em estudo, reduzindo as perdas de informação e preenchendo algumas lacunas existente entre a comunicação humana e os sistemas computacionais, tornando, desta forma, a decisão final muito mais coerente (Zadeh, 1965a). Tendo em conta a alta flexibilidade que se adquire nas respostas obtidas, esta lógica permite um desenvolvimento exponencial no que toca aos sistemas de apoio à decisão, em áreas onde a lógica e a matemática convencionais revelam-se ineficientes (Sousa, 2014).

A ideia de aplicar conjuntos difusos a problemas de controle foi apresentada pela primeira vez por Zadeh (1972) e Sheldon e Zadeh (1972), mas foram Mandani e

Assilian (1975) e Mandani (1976) quem realmente aprofundaram a teoria dessa aplicação. O trabalho de Mamdani acabou por influenciar muitos outros investigadores a dedicarem-se a diferentes aplicações da teoria de conjuntos difusos (Klir e Yuan, 1996). Ao longo dos tempos, a lógica difusa começou a ganhar grande protagonismo e muitos países começaram a investir cada vez mais no seu desenvolvimento. Em meados da década de 90, começaram a surgir as primeiras aplicações práticas, no entanto, a sua utilização continua ainda hoje a aumentar e denota-se a vastidão da aplicação nas mais diversas áreas científicas (Jantzen, 2013), nomeadamente, na medicina (Al-Kasasbeh et al., 2013), na construção civil (Beljkas et al., 2019), entre outras.

Nos próximos subcapítulos serão abordados os conceitos teóricos base da teoria dos conjuntos difusos (conjuntos difusos, função de pertença, operações e regras difusas), respetivo raciocínio difuso e serão apresentados também os métodos mais importantes de inferência difusa e dos mais utilizados no que diz respeito à lógica difusa.

3.2 Teoria dos conjuntos difusos

No seu trabalho, Zadeh fez notar que existem muitos conjuntos onde não é possível determinar com precisão se um elemento pertence ou não a esse conjunto, sendo essa a força motivadora para a criação da sua teoria de conjuntos difusos (Zadeh, 1965a). Através dessa teoria, reforçou a ideia de que não é possível classificar os elementos somente como “completamente verdadeiros” ou “completamente falsos”, pelo que, posteriormente, e como consequência, sugeriu a criação de uma escala gradual, onde eram definidos os graus de um elemento pertencer a um certo conjunto, o chamado grau de pertença (Zadeh, 1996). Ou seja, de um modo representativo, pode-se observar na Figura 3.1, uma comparação simplificada da comparação entre as duas lógicas.

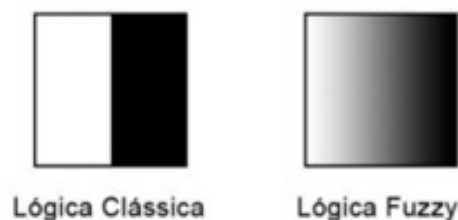


FIGURA 3.1: Comparação entre a lógica clássica e a lógica difusa (Kohagura, 2007)

De acordo com a Figura 3.1, é possível verificar as diferenças entre ambas as lógicas. Enquanto na lógica clássica, um elemento apenas pode pertencer a dois conjuntos possíveis (preto e branco), ou seja, os seus conjuntos têm as fronteiras muito bem definidas, onde um elemento apenas pode pertencer a um dos conjuntos, na lógica difusa, existe a possibilidade de uma classificação intermédia, i.e., o elemento para além de poder pertencer somente ao preto ou somente ao branco, pode também pertencer a qualquer uma das zonas da escala de cinzentos (sendo parcialmente preto e parcialmente branco) (Kohagura, 2007).

3.2.1 Conjuntos difusos e função de pertença

Um conjunto difuso é definido como um conjunto onde os seus elementos/objetos são definidos por graus de pertença normalizados entre zero e um. Considerando A um certo conjunto difuso pertencente a um universo X , podemos caracterizá-lo pela seguinte função:

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (3.1)$$

Esta função é denominada de função de pertença, sendo definida, graficamente, como uma curva que determina a característica do conjunto difuso, atribuindo a cada elemento um grau de pertença (Wang, 2015).

Voltando à distinção entre lógica clássica e difusa, é possível descrever essa diferença matematicamente definindo a função de pertença $f(x)$ para cada caso. Seja A um conjunto e $x \in X$ um certo elemento, essa função de pertença, na lógica clássica, será dada por:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \notin A \\ 1, & x \in A \end{cases} \quad (3.2)$$

e, na lógica difusa,

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \notin A \\ \mu(x), & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \\ 1, & x \in A \end{cases} \quad (3.3)$$

onde $\mu(x)$ será o grau de pertença do elemento x assumindo valores no intervalo $]0, 1[$.

Resumindo, a partir das representações matemáticas conseguimos aferir que, no caso da lógica clássica, as variáveis avaliadas apenas adquirem valores verdadeiros (1) ou falsos (0), ao passo que, nas variáveis avaliadas pela lógica difusa, é possível expressar valores lógicos intermédios entre 0 (completamente falso) e 1 (completamente verdadeiro), numa tentativa de se descrever com maior eficácia a incerteza do mundo real (Sousa, 2014).

Apesar de existirem infinitas formas distintas de representar as funções de pertença, algumas das mais comuns e mais utilizadas são as funções triangulares, trapezoidais e gaussianas, pois as suas fórmulas são bastante simples e apresentam uma eficiência computacional bastante elevada («Fuzzy Logic Membership Function», 2015). Estas estão ilustradas na Figura 3.2 e podem ser matematicamente representadas por:

- **Função Triangular:**

$$\mu_{tri}(x; a, b, c) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \quad (3.4)$$

- **Função Trapezoidal:**

$$\mu_{trap}(x; a, b, c, d) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right) \quad (3.5)$$

- **Função Gaussiana:**

$$\mu_{gauss}(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2} \quad (3.6)$$

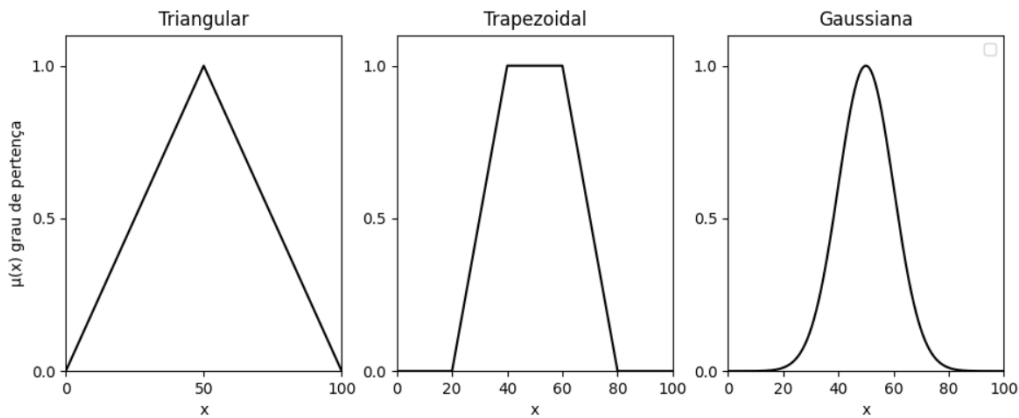


FIGURA 3.2: Exemplos mais comuns de funções de pertença: triangular, trapezoidal e gaussiana, respetivamente (adaptado de Sousa, 2014)

No presente trabalho, ir-se-á utilizar uma variante das funções de pertença gaussianas, a função de pertença baseada numa mistura de duas funções gaussianas que pode ser definida através de:

$$\mu_{gauss2}(x; a, b, \sigma_1, \sigma_2) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma_1}\right)^2}, & x < a \\ 1, & a \leq x \leq b \\ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-b}{\sigma_2}\right)^2}, & x > b \end{cases} \quad (3.7)$$

tendo em conta que permite obter o valor de pertença 1 num intervalo. Será importante notar que se se considerar que $a = b$ e que $\sigma_1 = \sigma_2$ a função μ_{gauss2} reduz-se à função de pertença gaussiana usual.

3.2.2 Operações lógicas

De forma similar à lógica clássica, na lógica difusa é possível aplicar várias operações lógicas. As operações lógicas são operações que têm como objetivo definir novos subconjuntos a partir de conjuntos previamente definidos.

Para uma melhor compreensão de como se processam estas operações, serão considerados, ao longo da presente subsecção, dois conjuntos difusos A e B, cujas funções de pertença são, respetivamente, $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$, para $x \in X$. Estes estão graficamente representados na Figura 3.3.

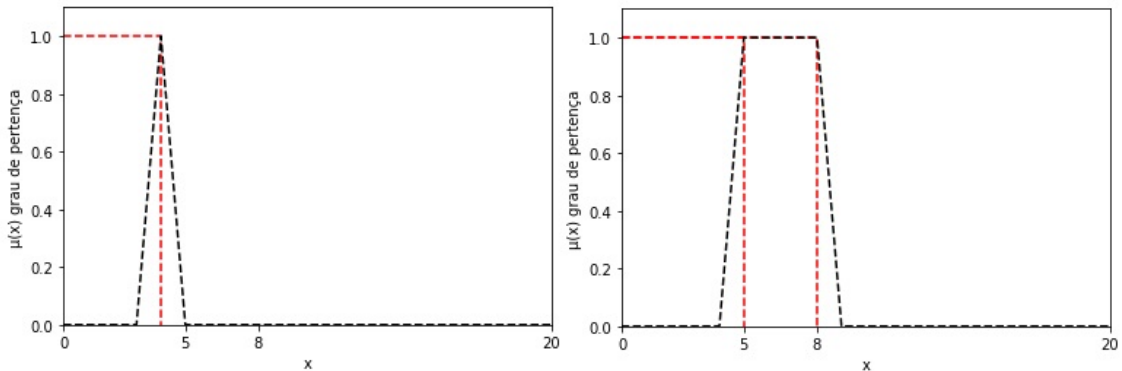


FIGURA 3.3: Conjunto difusos A e B, respetivamente (adaptado de Sousa, 2014)

As operações lógicas são bastante diversas, no entanto, as primeiras operações a serem estabelecidas por Zadeh (as mais básicas), e por sua vez as mais importantes (Zadeh, 1965a) são, designadamente:

- **Interseção (E):** A interseção de dois conjuntos difusos, gerará um novo conjunto onde, a sua função de pertença resultará no mínimo das funções de pertença dos conjuntos que se intersejam (Figura 3.4), ou seja,

$$\forall A, B \subseteq X : \quad \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.8)$$

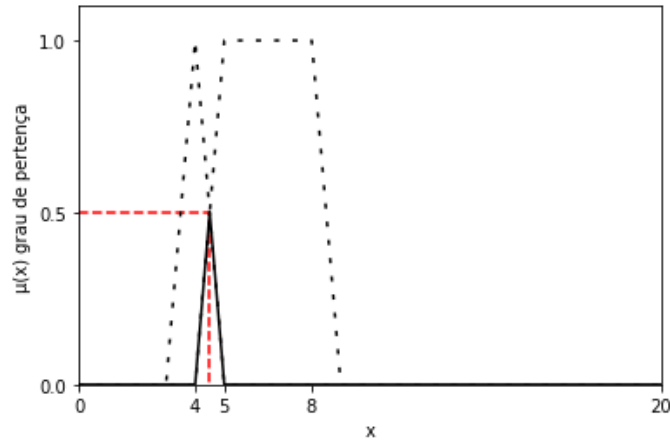


FIGURA 3.4: Interseção dos conjuntos difusos A e B (adaptado de Sousa, 2014)

- **União (OU):** A união de dois conjuntos difusos gerará um novo conjunto onde a sua função de pertença resultará no máximo das respectivas funções de pertença (Figura 3.5), ou seja,

$$\forall A, B \subseteq X : \quad \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.9)$$

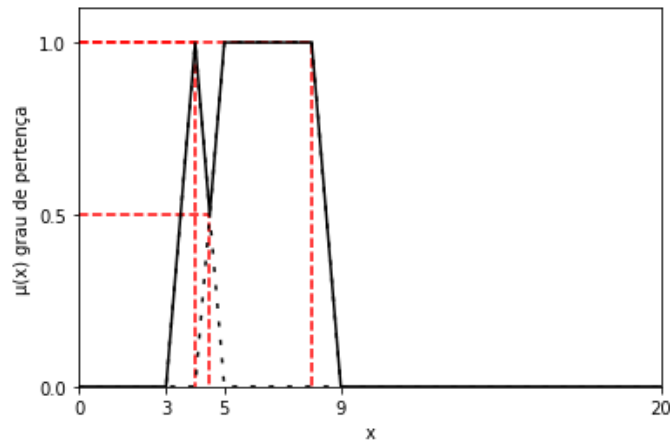


FIGURA 3.5: União dos conjuntos difusos A e B (adaptado de Sousa, 2014)

- **Complemento (NEGAÇÃO):** O complemento de um conjunto difuso gerará um novo conjunto, onde a sua função de pertença é o resultado da subtração de 1 pela função de pertença desse mesmo conjunto (Figura 3.6), isto é,

$$\forall A \subseteq X : \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.10)$$

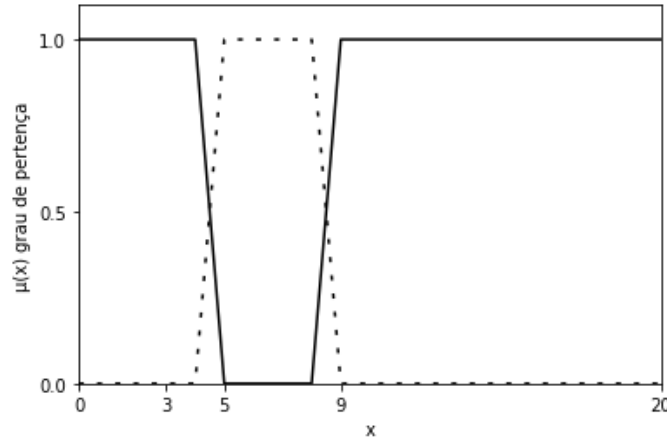


FIGURA 3.6: Complemento do conjunto difuso A (adaptado de Sousa, 2014)

Apesar de as três operações lógicas definidas acima serem as operações básicas e as primeiras a serem definidas por Zadeh, muitas outras podem ser utilizadas, nomeadamente, produto cartesiano, potências, soma algébrica, entre outras (Zimmermann, 2011).

3.2.3 Regras lógicas

As regras lógicas ou difusas são regras que se baseiam na criação de um ou mais antecedentes (que não passam de proposições difusas), interligados entre si através de operadores lógicos (E, OU, NEGAÇÃO, etc.), com o intuito de obter um conseqüente (implicação). Estas podem ser definidas pela seguinte expressão (Barbalho, 2001):

$$SE \ll \text{antecedentes} \gg ENTÃO \ll \text{consequente} \gg \quad (3.11)$$

Dada a complexidade de descrever com precisão a “lógica humana”, ao se adotarem as chamadas regras condicionais, obtém-se um leque mais vasto de respostas, sendo aqui onde a lógica clássica difere da lógica difusa. Na lógica clássica, se os

seus antecedentes fossem verdadeiros, isso implicava a que o seu consequente também o fosse, no entanto, na lógica difusa não existe a necessidade de o antecedente ser completamente verdade. Se o antecedente for verdadeiro com um certo grau de pertinência, então o seu consequente também o será com esse grau de pertinência. Estas relações condicionais entre antecedente-consequente, aproxima e adapta o conhecimento adquirido pelo sistema ao pensamento humano.

3.3 Etapas do raciocínio difuso

Como foi referido, as trocas de informação entre humanos é feita de forma bastante imprecisa, ou seja, cada individuo interpreta a informação que chega até si subjetivamente, decidindo, posteriormente, segundo o seu próprio modo de interpretação. No caso dos sistemas computacionais, já não funciona assim. Para que estes tenham um desempenho muito próximo ao da mente humana, é necessária a criação de sistemas difusos (Costa, 2018).

Os sistemas difusos não são mais do que sistemas condicionados pelas regras lógicas no processo de tomada de decisão, compostos essencialmente por 3 etapas: a etapa da fuzzificação, a aplicação do mecanismo de inferência e a etapa da desfuzzificação (Figura 3.7). De um modo resumido, temos que:

- **Fuzzificação** - etapa onde ocorre a transformação dos dados que se pretende analisar (dados de entrada) em conjuntos difusos, ou seja, existe a transformação/conversão de um valor real (variável numérica) num valor difuso (variável linguística) (Sousa, 2014);
- **Mecanismo de inferência** - etapa onde são alcançadas conclusões, através da conexão entre os dados de entrada com as regras que fazem parte da base do conhecimento. Nesta etapa, são aplicadas várias regras lógicas e os resultados de todas essas regras são combinadas segundo uma outra regra de inferência final (Sousa, 2014)(Wang, 2015);
- **Desfuzzificação** - etapa inversa à fuzzificação. Ocorre então a transformação/conversão dos valores difusos em valores reais, provenientes das inferências atingidas na etapa anterior (mecanismo de inferência) (Sousa, 2014).

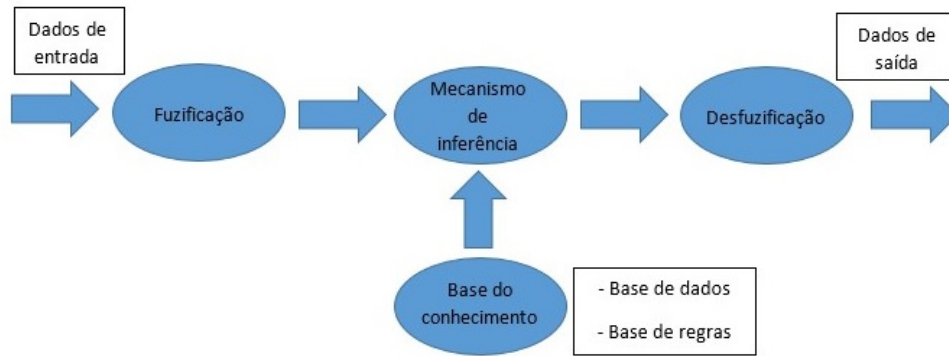


FIGURA 3.7: Esquema do Raciocínio Difuso (adaptado de Sousa, 2014)

É ainda importante realçar o facto de existirem vários métodos de desfuzificação, nomeadamente a média dos máximos (MOM), o primeiro e último dos máximos (FOM e LOM, respetivamente) (Samanta, s.d.), centróide (ou centro de massa, entre outros. No entanto, o mais comum é o método do centróide (Takagi e Sugeno, 1985), sendo por isso, o método escolhido para ser utilizado neste trabalho.

Em suma, o método do centróide baseia-se no centro de massa da área delimitada entre o eixo das abcissas e a curva da função de pertença, i.e., no centro geométrico da figura resultante. No processo de desfuzzificação, o valor pretendido corresponde à abcissa desse centro de massa. Este é matematicamente representado por, para o caso contínuo:

$$c = \frac{\int_c \mu_A(c) \cdot c \, dc}{\int_c \mu_A(c)} \quad (3.12)$$

onde c é a variável de saída e $\mu_A(c)$ o grau de pertença do conjunto difuso A correspondente à variável c , assumindo valores no intervalo $[0, 1]$.

Relativamente aos outros métodos de desfuzzificação, a MOM resulta da média dos valores de maior grau de pertença de um subconjunto difuso («Mean of Maximum (MoM) (PID and Fuzzy Logic Toolkit)», 2012). No caso da FOM, esta resulta como o próprio nome indica, no primeiro valor do domínio com grau de pertença mais elevado, enquanto o LOM resulta no último valor do domínio com o grau de pertença mais elevado (Samanta, s.d.).

Ainda relativamente às etapas do raciocínio difuso, e por forma a complementá-las, existem ainda duas componentes importantes, nomeadamente a **base das regras**, onde estão contidas as regras lógicas e, cujo objetivo principal é definir a

estratégia de funcionamento do sistema difuso, e a **base de dados**, onde estão contidos os dados difusos que se pretende analisar (respetivas funções de pertença e operadores lógicos). Ambas têm como principal objetivo definir uma relação entre os conjuntos difusos de entrada e de saída (fundamental em qualquer modelo), fazendo parte da chamada **base do conhecimento** (Sousa, 2014).

3.4 Modelo Mamdani

O modelo de Mamdani é um dos modelos de inferência mais utilizados para obter conclusões a partir das regras lógicas (Mamdani e Assilian, 1975). Este foi inicialmente projetado por Ebrahim Mamdani, cujo principal objetivo seria controlar uma combinação de uma caldeira com um motor a vapor, através da sintetização de um conjunto de regras de controlo linguísticos obtidos por operadores humanos experientes (Gonçalves, 2016). Hoje em dia é um modelo bastante utilizado em diversas áreas, nomeadamente na área da medicina, por exemplo, em sistemas de diagnóstico médico (GeeksforGeeks, 2020), na área da gestão e finanças (Bojadziev e Bojadziev, 2007) (Korol, 2012), na área da economia (Stojić, 2012), entre outras.

Este método baseia-se na regra de composição max-min. Ou seja, a interação efetuada entre consequentes de diferentes regras, por forma a gerar o subconjunto difuso de saída, é efetuada através da união dos subconjuntos (OU), enquanto a interação entre antecedentes nas próprias regras, é efetuada através da interseção dos conjuntos (E) (Silva, 2011).

Especificando o acima descrito, o modelo de Mamdani consiste em apenas cinco passos (Wang, 2015):

- **Fuzzificação** - neste primeiro passo, como já referido no subcapítulo 3.3, são efetuadas as conversões/transformações dos valores numéricos de entrada em variáveis linguísticas, por meio de funções de pertença. Através deste passo, são associados os respetivos graus de pertença para cada variável, no intervalo de 0 a 1;
- **Aplicação dos operadores lógicos** - neste segundo passo, são aplicados os operadores lógicos, criando todos os antecedentes pretendidos constituídos pela combinação dos conjuntos fuzzy de entrada, cuja principal função é definir novos subconjuntos a partir desses conjuntos iniciais (3.2.2). Se o grau de pertença resultante dessa combinação lógica de conjuntos for não nula, diz-se que a regra foi «ativada» (em inglês, «*fired*»). São mais comumente utilizadas as funções min e max (correspondendo aos operadores E e OU,

respetivamente), dada a sua simplicidade e eficácia (Wang, 2015), sendo, para tal, os utilizados no trabalho presente;

- **Aplicação do método da implicação** - no terceiro passo, é efetuada a modelação do conjunto difuso de saída (consequente) de cada regra, resultado da interação entre antecedentes da própria regra, cujo grau de pertença resultante irá truncar o conjunto difuso consequente através do método da implicação, resumindo-se à aplicação da função min ao máximo definido para esse conjunto e ao valor obtido na parte antecedente (operador lógico E). Obviamente, se uma regra não for ativada poder-se-á que o consequente se reduz ao grau de pertença constante e igual a 0;
- **Aplicação do método de agregação** - no penúltimo passo, é efetuada a agregação dos consequentes, ou seja, esta é resultado da interação entre os consequentes de todas as regras, por forma a gerar o conjunto difuso de saída final, correspondendo à união dos subconjuntos difusos consequentes (operador lógico OU);
- **Desfuzzificação** - como referido no subcapítulo 3.3, este passo tem como objetivo converter o conjunto difuso final num valor real. Como referido, o método mais comum é o método do centróide (Takagi e Sugeno, 1985), e, para tal, o utilizado no presente trabalho.

Para melhor entender estes cinco passos, observe-se o seguinte exemplo:

$$\text{Regra 1: } SE(x \text{ é } X_1 \text{ E } y \text{ é } Y_1) \text{ ENTÃO } z \text{ é } Z_1 \quad (3.13)$$

$$\text{Regra 2: } SE(x \text{ é } X_2 \text{ E } y \text{ é } Y_2) \text{ ENTÃO } z \text{ é } Z_2 \quad (3.14)$$

Ao serem definidas as regras 1 e 2, são efetuados os três primeiros passos (fuzzificação, aplicação dos operadores lógicos e aplicação do método de implicação), pelo que se obtém o seguinte:

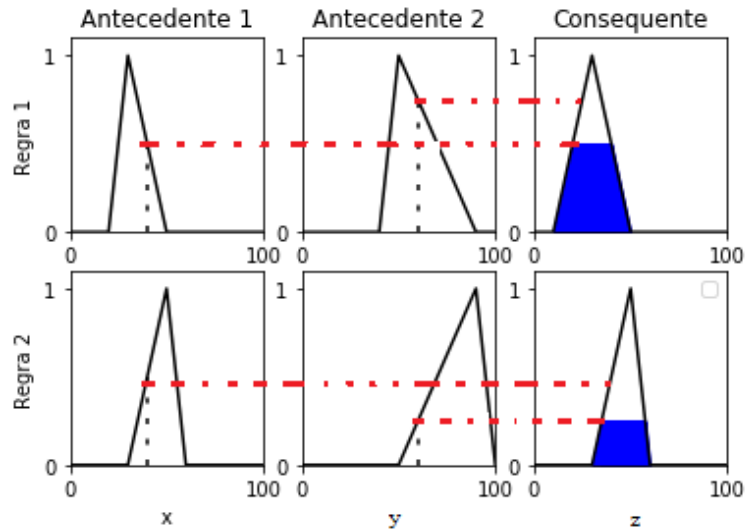


FIGURA 3.8: Conjuntos difusos de saída parciais obtidos segundo Mamdani

Após a obtenção dos diferentes consequentes (Z_1 e Z_2), é então aplicado o método de agregação, onde o subconjunto difuso de saída será dado por $Z = Z_1 \cup Z_2$, como é ilustrado na Figura 3.9

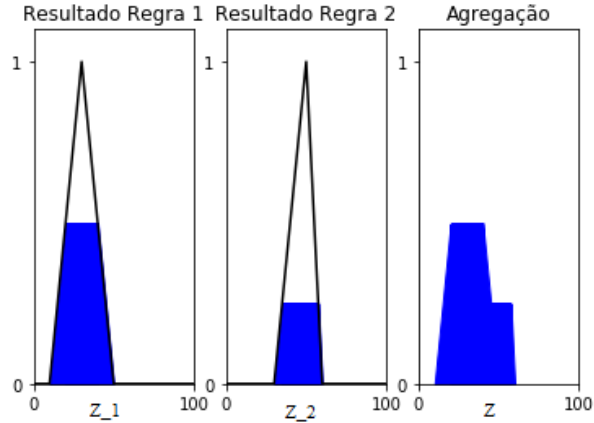


FIGURA 3.9: Conjunto difuso de saída final segundo Mamdani

Finalmente obtém-se o subconjunto difuso de saída, o conjunto Z . Segundo Mamdani, este subconjunto devolve como consequente difuso de todas as regras lógicas, o máximo das funções. É então no último passo, na desfuzzificação, que é aplicado o método do centróide na região Z resultante, ou seja, a coordenada horizontal do centro geométrico do gráfico difuso final.

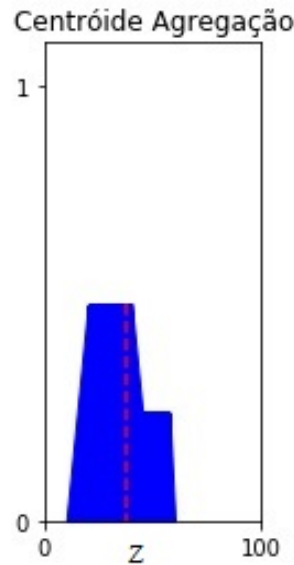


FIGURA 3.10: Desfuzzificação pelo centróide no conjunto difuso de saída final

3.5 Outros modelos

Existem outros modelos para além de Mamdani, nomeadamente o modelo de Takagi-Sugeno e o modelo de Tsukamoto. No entanto, neste trabalho apenas será utilizado o modelo de Mamdani a duas fases, uma vez que, dada a natureza do estudo, este é o modelo que nos permite descrever as experiências de forma mais intuitiva, humana e interpretável, tendo por isso, uma vasta utilidade no suporte das tomadas de decisão (Kaur e Kaur, 2012).

Modelo de Takagi-Sugeno

O modelo de Takagi-Sugeno foi um modelo proposto por Takagi, Sugeno e Kang, em 1985, cujo seu principal objetivo foi desenvolver uma abordagem sistemática para gerar regras lógicas a partir de um determinado conjunto de dados de entrada-saída (Takagi e Sugeno, 1985). Este modelo é similar ao modelo de Mamdani, pois também caracterizado por regras lógicas Se-Então, no entanto, a grande diferença entre estes está na forma de análise da função de saída, pelo que os seus consequentes são descritos através de funções lineares (GeeksforGeeks, 2020).

A saída final do sistema difuso é dada pelo cálculo da média ponderada Y , através da soma das saídas das regras divididas pela soma dos valores de ativação (Santos, 2014), ou seja:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^c w_i y_i}{\sum_{i=1}^c w_i} \quad (3.15)$$

onde y_i são os valores resultantes da função consequente e w_i são os valores provenientes da interseção das funções de pertinência dos conjuntos difusos. Desta forma é possível observar que este modelo não necessita de um método de desfuzzificação para gerar a saída do sistema, uma vez que Y já é um valor real.

Modelo de Tsukamoto

O modelo de Tsukamoto et al. (1979) é um modelo que, de certa forma, combina os dois modelos atrás referidos. A primeira fase deste modelo é similar ao modelo de Mamdani, pois também caracterizado por regras lógicas Se-Então, no entanto, o consequente de cada regra já apresenta semelhanças com o modelo de Takagi-Sugeno. Este é representado por um conjunto difuso, cuja função de pertinência é monótona, ou seja, não apresenta variações (Delgado, 2002), pelo que a sua saída final será obtida pela média ponderada Y (3.15).

Capítulo 4

Desenvolvimento do sistema de apoio à decisão

4.1 Introdução

A escolha de um sistema AIP adequado para implementar nos submarinos é uma tarefa que, para além de ser considerada de extrema importância para qualquer Marinha (pois tem impacto na sua gestão estratégica), é também deveras complexa, pois dada a complexidade e desenvolvimentos das tecnologias atualmente, é necessário ter em consideração inúmeros fatores. A necessidade e a capacidade de uma nação são alguns dos fatores preponderantes e essenciais para uma escolha de sucesso.

Dependendo do tipo de Marinha, das missões em que está inserido, ou até mesmo do responsável por efetuar o estudo, os critérios de seleção também podem variar. Dado esse facto, cada critério deve ser analisado com elevada cautela, e a decisão deve ser efetuada consoante os resultados da análise/estudo detalhada/o.

Tendo em conta a complexidade dessa análise, o processo de tomada de decisão acaba por ser bastante moroso e sujeito à subjetividade de cada especialista que os analise, havendo por isso, a necessidade de criar soluções capazes de colmatar essa demora. A utilização de sistemas de inferência difusa neste tipo de análises torna-se bastante útil, pois reduz de certa forma, o tempo de decisão, e minimiza a imprecisão nas tomadas de decisão (aproximando sempre os resultados ao pensamento de quem elabora o estudo).

Assim, tendo em conta a sua grande vantagem e a sua vasta aplicação na resolução de vários problemas, foi criado um sistema inteligente em linguagem *Python*, usando especificamente a ferramenta *scikit-fuzzy*, pertencente à biblioteca

scikit-learn («skfuzzy 0.2 docs», [s.d.](#)), que servirá de auxílio na tomada de decisão de qual o melhor sistema AIP a adotar nos submarinos convencionais.

4.2 Metodologia

Para a criação deste sistema de inferência, primeiramente foi necessário elaborar um estudo teórico dos diferentes sistemas (células de combustível, motores de Stirling de ciclo fechado, turbinas a vapor de ciclo fechado e motores a Diesel de circuito fechado), presente no Capítulo [2](#), e definir quais as variáveis fundamentais e mais importantes para efetuar uma melhor comparação. De seguida, as variáveis definidas foram englobadas em subcategorias, por forma a facilitar essa mesma comparação.

Para finalizar esta etapa, foi necessário também definir um consequente, nomeadamente, o nível de recomendação que cada sistema terá, que nos dirá qual o sistema que melhor cumpre com os requisitos predefinidos (regras).

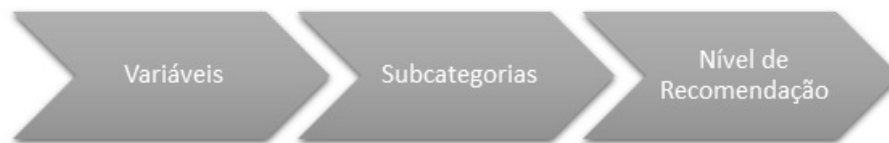


FIGURA 4.1: Processo de definição de variáveis, subcategorias e nível de recomendação

Após efetuada essa divisão (variáveis, subcategorias e nível de recomendação), foi necessário construir os conjuntos difusos respeitantes a essas variáveis. Ou seja, como referido no capítulo anterior, é essencial para o funcionamento do sistema difuso, a transformação dos dados que se pretende analisar (variáveis numéricas) em conjuntos difusos (variáveis linguísticas). Essa modelação foi feita com o auxílio de um engenheiro versado no assunto, e também com base no estudo teórico elaborado.

Seguidamente, foi elaborada a base das regras recorrendo a um questionário ([Apêndice A](#)) efetuado a entidades como Comandante Naval, Comandante e ex-comandante da Esquadilha de Submarinos, Chefe e ex-chefe da Divisão de Operações do Estado-Maior da Armada, Comandantes e ex-comandantes dos submarinos da classe *Tridente*, Imediatos dos submarinos da classe *Tridente*, Chefes e ex-chefes do Serviço de Máquinas dos submarinos da classe *Tridente* e Engenheiros da Divisão de Submarinos da Direção de Navios.

De imediato, foi definido qual o método de inferência a utilizar: o modelo de Mamdani (3.4), como já foi referido no Capítulo 3. Este método será utilizado a duas fases: entre características e subcategorias, e finalmente entre subcategorias e nível de recomendação. Uma das vantagens da divisão a duas fases, passa pela disponibilização de três subcategorias difusas de difícil categorização, que permitem uma visualização mais geral do perfil de cada sistema avaliado.

4.3 Variáveis de entrada

Tendo em conta que qualquer um dos sistemas que está em estudo poderá ser implementado nos submarinos da atualidade, assume-se que qualquer problema que advinha da instalação dos diferentes sistemas e quaisquer que sejam as implicações estruturais em termos de estabilidade, serão solucionados pela engenharia naval.

Para proceder à comparação dos diferentes sistemas, é necessária a seleção de características adequadas. Após o estudo teórico elaborado no Capítulo 2, e por forma a proceder a uma comparação coerente, foram eleitas as seguintes características: eficiência, potência, assinatura acústica, custo de aquisição, custo de manutenção, custo de operação, emissão térmica, tipo de subproduto expelido e tamanho/espaco ocupado.

Existem ainda muitas outras variáveis que poderiam ter sido utilizadas para comparação, nomeadamente a segurança, a autonomia e o consumo, no entanto estas não se consideraram essenciais ao estudo. No caso da segurança, esta não é uma variável que seja necessário explorar, pois os sistemas de hoje em dia estão de tal maneira estudados e desenvolvidos, que a construção naval lida bem com essas problemáticas (ou seja não são consideráveis).

No que toca à autonomia, esta não foi considerada, porque para além de depender sempre do sistema, depende também da plataforma onde é inserida (não é intrínseca ao sistema). Esta é dada pelo equilíbrio entre o sistema, a capacidade de armazenamento que lá foi instalada e o próprio consumo da plataforma, variáveis que são utilizadas para calcular a eficiência. Em contrapartida, utiliza-se a eficiência que é intrínseca ao próprio sistema, ou seja, não está dependente da plataforma. Relativamente ao consumo, este também não foi considerado pois já está, de certa forma englobado na variável «custo de operação».

Por forma a facilitar a comparação, as variáveis anteriormente definidas foram englobadas em três subcategorias diferentes, designadamente: dimensão operacional, dimensão económica e dimensão ambiental. Esta divisão permite uma

avaliação a três aspetos fundamentais: ao nível operacional, onde se encontram características mais técnicas do sistema como é o caso da eficiência, da potência e da assinatura acústica; ao nível económico, onde são englobados os custos provenientes de cada sistema e que estes podem vir a acarretar (custo de aquisição, custo de manutenção e custo de operação); e por fim, ao nível ambiental, onde se tenta aferir se os sistemas têm algum tipo de impacto ambiental.

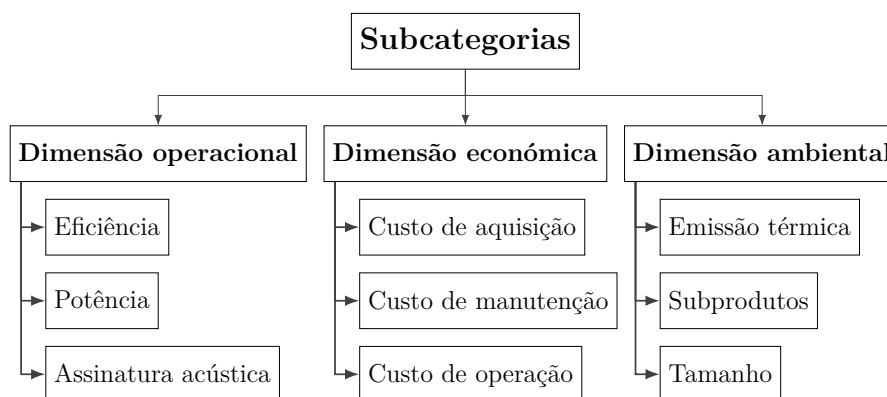


FIGURA 4.2: Subcategorias e respetivas características eleitas para avaliar um sistema AIP

Dado que o presente trabalho se trata de um trabalho académico, e os sistemas abordados serem sistemas militares, existe muita informação que é confidencial/secreta, pelo que o acesso a informação concreta não é efetivo. Por essa razão, a fuzzificação dos dados não obtidos é meramente qualitativa, baseando-se sobretudo no estudo teórico dos diversos sistemas.

Não obstante esse facto, este sistema é moldável. Numa situação real, qualquer Marinha vai efetivamente realizar este estudo, efetuando um trabalho de intervenção junto de construtores e fornecedores, obtendo desta forma dados concretos. Após essa aquisição de dados concretos, é possível moldar o sistema já criado ou, por outro lado, normalizar as variáveis novas aos valores definidos em cada conjunto difuso.

4.3.1 Dimensão operacional

A dimensão operacional é uma subcategoria que tem como finalidade contribuir objetivamente para o desempenho operacional dos submarinos, atendendo aos requisitos operacionais definidos pela Marinha. Como anteriormente descrito, esta é composta pelas variáveis eficiência, potência e assinatura acústica.

No caso da **eficiência**, esta traduz-se pela razão entre a quantidade de energia/calor que é necessário dar ao sistema e o trabalho que se obtém do mesmo. Ou seja, se um certo sistema for dotado de uma eficiência bastante elevada, obtém-se uma grande vantagem do ponto de vista operacional, visto que se vai obter um suporte energético muito mais duradouro. No entanto, o mesmo acontece no sentido contrário. Se o sistema for dotado de uma eficiência relativamente baixa, o suporte energético também será muito menor.

Para esta variável, visto conseguir-se adquirir valores concretos (de 0 a 100 %), foram definidos 4 conjuntos difusos {Muito Má (MM), Má (M), Boa (B), Muito Boa (MB)}, cujas suas funções de pertença foram definidas através de uma mistura de duas funções gaussianas, utilizando a função definida em (3.7), como se pode observar na Figura 4.3. Na tabela 4.1, encontram-se os conjuntos difusos definidos e respetivos valores médios (a, b) e desvios padrão (σ_1, σ_2) de cada função de pertença. A omissão de alguns valores de desvios padrão justifica-se pela sua irrelevância para a função de pertença.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Muito Má | 0 | - | 8 | 8 |
| Má | 27 | 8 | 42 | 8 |
| Boa | 60 | 7 | 73 | 7 |
| Muito Boa | 90 | 7 | 100 | - |

TABELA 4.1: Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertença da Eficiência

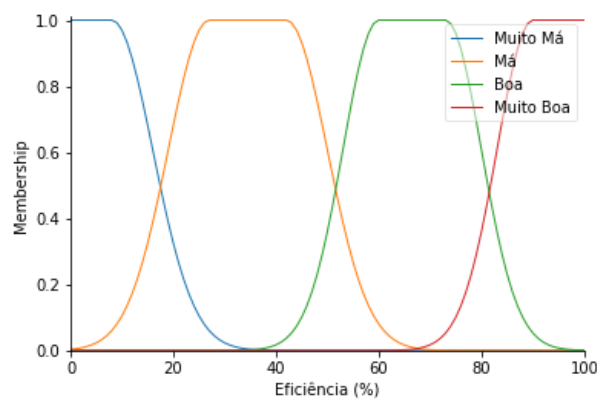


FIGURA 4.3: Funções pertença - Eficiência

Os valores a, b, σ_1, σ_2 adotados para esta e para as restantes variáveis onde foi possível a aquisição de valores concretos, derivam da sensibilidade adquirida resultante do estudo teórico elaborado (sendo uma avaliação muito empírica), por

forma a obter uma distinção plausível e fidedigna entre os valores dos diferentes sistemas, visto não existir uma escala universal para as avaliar.

A ideia principal foi a divisão das variáveis em 4 conjuntos difusos distintos, onde estes teriam o mesmo intervalo. Posteriormente os valores dessas divisões foram moldados de forma a cumprir com os propósitos específicos de otimização do sistema difuso. Ou seja, considerou-se que o sistema difuso seria ótimo se a interseção de dois conjuntos difusos consecutivos (por exemplo no caso da eficiência, MM e M) acontecer onde o grau de pertença atinge os 0,5, ao mesmo tempo que, se o máximo de um conjunto coincidir com o mínimo do outro. Assim, se obtiveram os valores a, b, σ_1, σ_2 presentes na tabela 4.1.

Relativamente à variável **potência**, esta é traduzida pela rapidez com a qual uma certa quantidade de energia é transformada em trabalho. Ou seja, se um sistema é dotado de uma potência bastante elevada, isso é bastante benéfico do ponto de vista operacional, pois esse sistema tem assim a capacidade de efetuar cargas rápidas às baterias. No entanto, o mesmo acontece no sentido contrário. Se o sistema for dotado de uma potência relativamente baixa, a capacidade de efetuar cargas rápidas será muito menor. Já a variável **assinatura acústica** é definida como sendo o registo do nível de ruído provocado pelo equipamento em pleno funcionamento.

Para estas duas variáveis anteriormente descritas (potência e assinatura acústica), não foi possível adquirir valores concretos, visto serem de carácter confidencial. Não obstante desse facto, foi elaborada uma escala qualitativa (0-10).

Para o caso da variável potência, foram definidos 4 conjuntos difusos {MM, M, B, MB}, cujas suas funções de pertença foram também definidas através de uma mistura de duas funções gaussianas (3.7), como se pode observar na Figura 4.4. Na tabela 4.2, encontram-se os conjuntos difusos definidos e respetivos a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertença.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Muito Má | 0 | - | 0,8 | 0,8 |
| Má | 2,7 | 0,8 | 4,2 | 0,8 |
| Boa | 6 | 0,7 | 7,3 | 0,7 |
| Muito Boa | 9 | 0,7 | 10 | - |

TABELA 4.2: Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertença da Potência

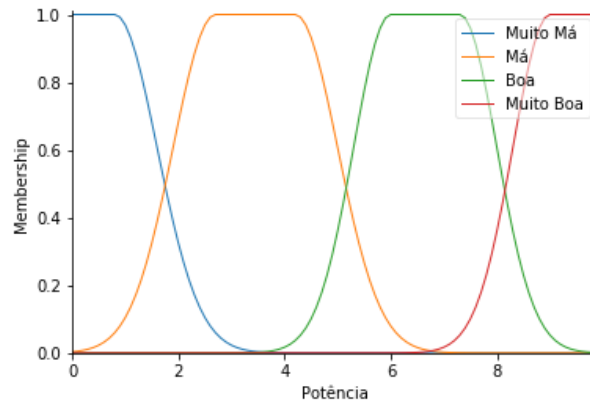


FIGURA 4.4: Funções pertinência - Potência

No caso da variável assinatura acústica foram definidos 4 novos conjunto {Muito Baixa(MB), Baixa(B), Alta(A), Muito Alta(MA)}, cujas respectivas funções de pertinência coincidem com as da variável potência, estando igualmente definidas (3.7), como se pode observar na Figura 4.5. Na tabela 4.3 encontram-se novamente os conjuntos difusos definidos e respetivos a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertinência..

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Muito Baixa | 0 | - | 0,8 | 0,8 |
| Baixa | 2,7 | 0,8 | 4,2 | 0,8 |
| Alta | 6 | 0,7 | 7,3 | 0,7 |
| Muito Alta | 9 | 0,7 | 10 | - |

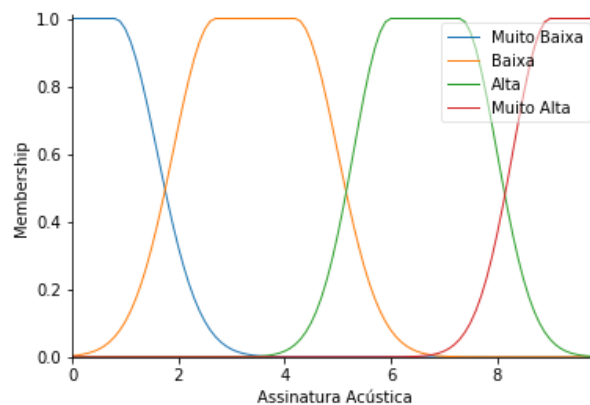
TABELA 4.3: Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência da Assinatura Acústica


FIGURA 4.5: Funções pertinência - Assinatura Acústica

No caso destas variáveis e das que serão referidas mais adiante, cujos valores concretos não foram possíveis de adquirir, foi elaborada uma escala qualitativa (0-10), onde os valores a, b, σ_1, σ_2 adotados foram os mesmo que os utilizados para a

variável eficiência, mas reformulados para a respetiva escala, como se pode observar nas tabelas 4.2 e 4.3.

Através da definição das três variáveis atrás mencionadas (eficiência, potência e assinatura acústica) é possível obter a primeira subcategoria - **dimensão operacional**. Foram então definidos 3 conjuntos difusos {Baixa (B), Média (M), Elevada(E)}, em que as suas respetivas funções de pertença foram também definidas através de uma mistura de duas funções gaussianas (3.7), como se pode observar na Figura 4.6. Na tabela 4.4 podemos consultar os respetivos conjuntos difusos definidos, a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertença.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Baixa | 0 | - | 15 | 10 |
| Média | 38 | 8 | 62 | 8 |
| Elevada | 85 | 10 | 100 | - |

TABELA 4.4: Parâmetros a, b, σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertença da Dimensão Operacional

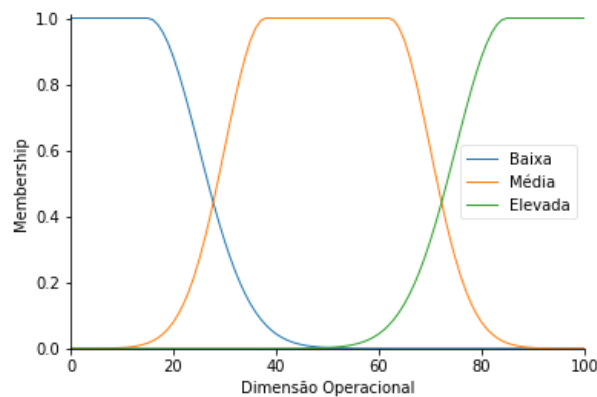


FIGURA 4.6: Funções pertença - Dimensão Operacional

Novamente, a ideia destes valores adotados (a, b, σ_1, σ_2), baseou-se agora na divisão das diferentes dimensões (operacional, económica e ambiental) em apenas 3 conjuntos distintos, onde estes teriam o mesmo intervalo. Posteriormente, os valores dessas divisões foram novamente moldados de forma a cumprir com os propósitos específicos de otimização do sistema difuso. Desta forma, obtiveram-se assim, os valores a, b, σ_1, σ_2 presentes na tabela 4.4.

Como foi referido anteriormente, o método de inferência utilizado em toda a dissertação será o modelo de Mamdani (3.4). Tendo já a dimensão operacional e as variáveis que a compõem completamente definidas (base de dados), para se conseguir retirar as inferências necessárias, é necessária ainda a criação da base das

regras. Esta foi feita e moldada consoante as respostas obtidas nos questionários realizados (A).

Considerando então os conjuntos definidos pelas respectivas variáveis e subcategoria, as regras apresentadas serão apresentadas da seguinte forma:

- REGRA 1 - SE eficiência MM, potência MM e assinatura acústica MB, ENTÃO dimensão operacional M.
- REGRA 2 - SE eficiência MM, potência MM e assinatura acústica B, ENTÃO dimensão operacional B.
- ...
- REGRA 63 - SE eficiência MB, potência MB e assinatura acústica A, ENTÃO dimensão operacional E.
- REGRA 64 - SE eficiência MB, potência MB e assinatura acústica MA, ENTÃO dimensão operacional M.

Para uma consulta mais pormenorizada de toda a base das regras, estão apresentadas no Anexo II todas as regras definidas tanto para as dimensões como para o nível de recomendação.

4.3.2 Dimensão económica

A dimensão económica é uma subcategoria relativa aos custos associados ao sistema. Esta é composta pelas variáveis: **custo de aquisição**, onde esta se assume como qualquer custo que advinha da aquisição do sistema e sistemas auxiliares; **custo de manutenção**, que se traduz pelos custos que advêm da manutenção de tais sistemas e respetivos auxiliares; e por fim, **custo de operação**, que é definido pelos custos referentes à operação dos sistemas (consumo, reabastecimento, etc).

Tendo em conta que a questão dos custos é sempre informação bastante sensível, onde somente quem assina os contratos é que tem acesso a dados concretos, não foi possível adquirir dos mesmos, pelo que a fuzzificação será também meramente qualitativa (escala de 0 - 10).

Admite-se então que estas três variáveis foram ambas definidas por 4 conjuntos {Muito Baixo(MB), Baixo(B), Alto(A), Muito Alto(MA)}, cujas respetivas funções de pertença coincidem com as variáveis anteriormente descritas, estão igualmente definidas através de uma mistura de duas funções gaussianas (3.7), como

se pode observar nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Na tabela 4.5 encontram-se também indicados os conjuntos difusos definidos, a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertinência.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Muito Baixo | 0 | - | 0,8 | 0,8 |
| Baixo | 2,7 | 0,8 | 4,2 | 0,8 |
| Alto | 6 | 0,7 | 7,3 | 0,7 |
| Muito Alto | 9 | 0,7 | 10 | - |

TABELA 4.5: Parâmetros a, b, σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertinência dos Custos

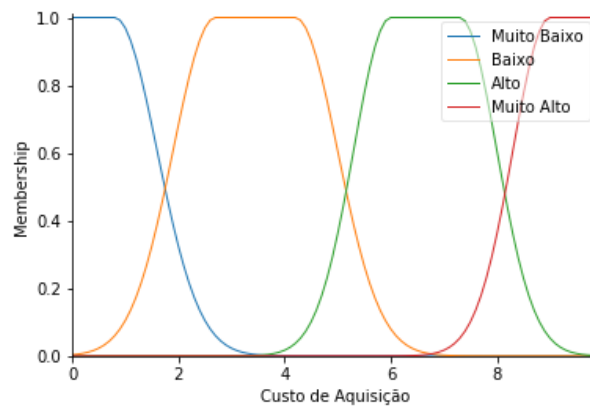


FIGURA 4.7: Funções pertinência - Custo de Aquisição

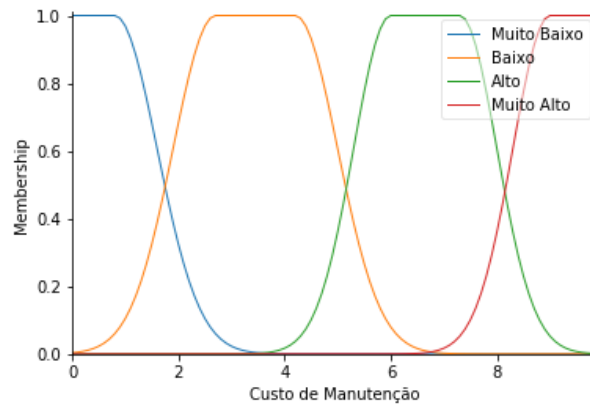


FIGURA 4.8: Funções pertinência - Custo de Manutenção

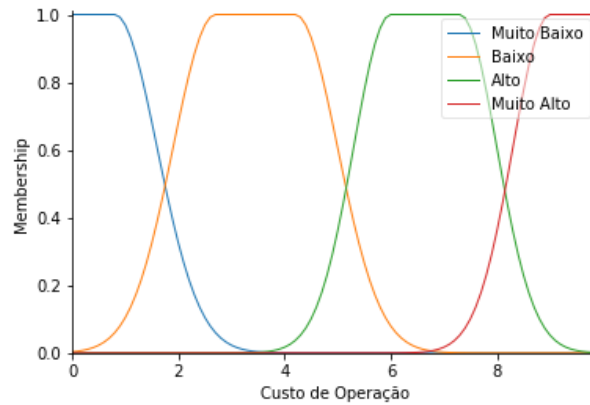


FIGURA 4.9: Funções pertinência - Custo de Operação

Dado que a variável **dimensão económica** é constituída pelos mesmos 3 conjuntos difusos da dimensão operacional (B, M, E), apresenta-se então apenas a Figura 4.10, onde se pode visualizar as suas funções de pertinência, e cujos valores dos valores médios a, b e valores de desvios padrão σ_1, σ_2 são idênticos aos da tabela 4.4

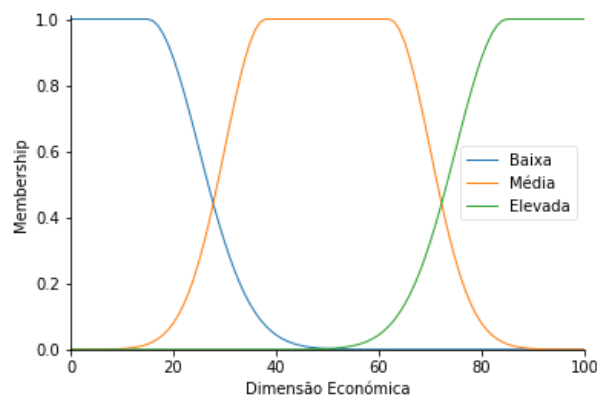


FIGURA 4.10: Funções pertinência - Dimensão Económica

4.3.3 Dimensão ambiental

A dimensão ambiental é uma subcategoria que tem como finalidade verificar de que forma, ou em que medida é que o próprio sistema afeta o meio ambiente em que opera. Como anteriormente descrito, esta é composta pelas variáveis emissão térmica, tipo de subprodutos expelidos e tamanho/volume ocupado.

Relativamente à variável **emissão térmica**, esta traduz-se pelas temperaturas provenientes do funcionamento dos diferentes sistemas. Neste caso, como foi possível adquirir estes valores concretos através do estudo teórico, pelo que para esta variável foram definidos 4 conjunto difuso {Muito Baixa(MB), Baixa(B), Alta(A),

Muito Alta(MA)}, cujas respetivas funções de pertença foram também definidas através de uma mistura de duas funções gaussianas (3.7), como é possível observar na Figura 4.11. Na tabela 4.6 encontram-se também indicados os conjuntos difusos definidos, a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertença.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Muito Baixa | 0 | - | 60 | 80 |
| Baixa | 250 | 80 | 350 | 80 |
| Alta | 530 | 70 | 630 | 70 |
| Muito Alta | 800 | 70 | 900 | - |

TABELA 4.6: Parâmetros a, b, σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertença da Emissão Térmica

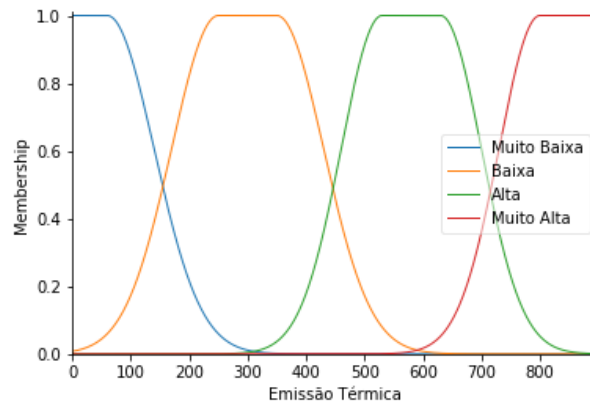


FIGURA 4.11: Funções pertença - Emissão térmica

No caso da variável **subproduto**, esta traduz-se pelo tipo de subproduto expelido pelos sistemas, ou seja, se este é de alguma forma poluente ou não. Havendo uma abertura à subjetividade, devido à incapacidade de adquirir a quantidade de subprodutos resultantes do funcionamento dos diversos sistemas, admite-se então que esta variável é definida por 4 conjuntos difusos {Pouco Poluente(PP), Poluente(P), Muito Poluente(MP), Extremamente Poluente(EP)}, e onde as respetivas funções de pertença foram definidas também através de uma mistura de duas funções gaussianas (3.7), conforme se pode observar na Figura 4.12. Na tabela 4.7 encontram-se também indicados os conjuntos difusos definidos, a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertença.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-----------------------|-----|------------|-----|------------|
| Pouco Poluente | 0 | - | 0,8 | 0,8 |
| Poluente | 2,7 | 0,8 | 4,2 | 0,8 |
| Muito Poluente | 6 | 0,7 | 7,3 | 0,7 |
| Extremamente Poluente | 9 | 0,7 | 10 | - |

TABELA 4.7: Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertença dos Subprodutos

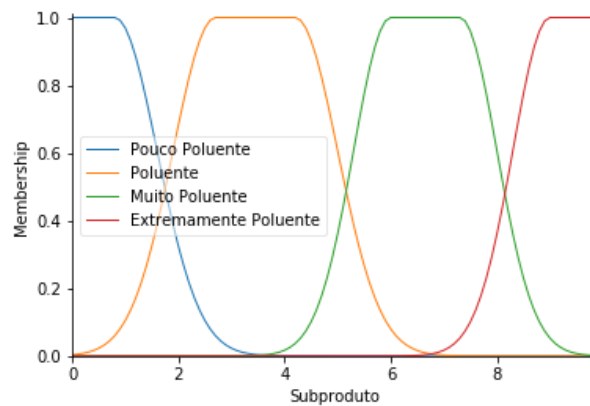


FIGURA 4.12: Funções pertença - Subproduto

No que toca à variável **tamanho**, esta traduz-se pelo espaço/volume ocupado pelo sistema. Como aconteceu com muitas das outras variáveis, não foi possível adquirir valores concretos, pelo que novamente, a fuzzificação foi meramente qualitativa. Esta variável é então novamente definida por estes 4 conjunto difusos {Muito Baixo(MB), Baixo(B), Alto(A), Muito Alto(MA)}, onde as respetivas funções de pertença foram definidas também através de uma mistura de duas funções gaussianas (3.7), conforme se pode observar na Figura 4.13. Na tabela 4.8 encontram-se também indicados os conjuntos difusos definidos, a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertença.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Muito Baixo | 0 | - | 0,8 | 0,8 |
| Baixo | 2,7 | 0,8 | 4,2 | 0,8 |
| Alto | 6 | 0,7 | 7,3 | 0,7 |
| Muito Alto | 9 | 0,7 | 10 | - |

TABELA 4.8: Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertença do Tamanho

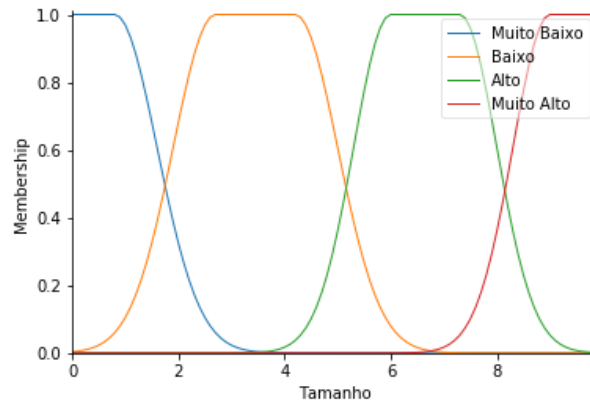


FIGURA 4.13: Funções pertinência - Tamanho

Visto que a variável **dimensão ambiental** é também constituída pelos mesmos 3 conjuntos difusos da dimensão operacional e a dimensão económica (B, M, E), apresenta-se então apenas a Figura 4.14, onde se pode visualizar as suas funções de pertinência, e cujos valores dos valores médios a, b e valores de desvios padrão σ_1, σ_2 são idênticos aos da tabela 4.4.

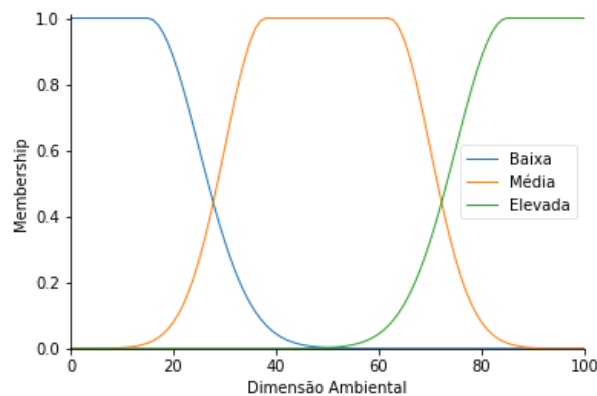


FIGURA 4.14: Funções pertinência - Dimensão Ambiental

4.4 Variável de saída

Como variável de saída deste sistema, tem-se o **nível de recomendação**. Este é resultado da combinação dos valores reais obtidos pelas diferentes subcategorias (após utilização do centróide - 3.12). Através disso, é obtido o nível de recomendação do sistema. Este advém novamente da base das regras, que como referido anteriormente, advém das respostas obtidas no questionário elaborado a especialistas (oficiais e engenheiros da área operacional versados neste assunto).

Para que essas inferências sejam postas em prática, é ainda necessário definir a variável de saída. Esta foi definida por 5 conjuntos difusos {Muito Baixo(MB), Baixo(B), Médio(M), Elevado(E), Muito Elevado(ME)}, cujas suas funções de pertença, foram igualmente definidas através de uma mistura de duas funções gaussianas (3.7), conforme se pode observar na Figura 4.15. Na tabela 4.9 encontram-se também indicados os conjuntos difusos definidos, a, b e σ_1, σ_2 de cada função de pertença.

| Conjuntos difusos | a | σ_1 | b | σ_2 |
|-------------------|-----|------------|-----|------------|
| Muito Baixo | 0 | - | 10 | 5 |
| Baixo | 23 | 5 | 33 | 5 |
| Médio | 45 | 5 | 55 | 5 |
| Elevado | 68 | 5 | 78 | 5 |
| Muito Elevado | 90 | 5 | 100 | - |

TABELA 4.9: Parâmetros a , b , σ_1 e σ_2 de cada uma das funções de pertença do Nível de Recomendação

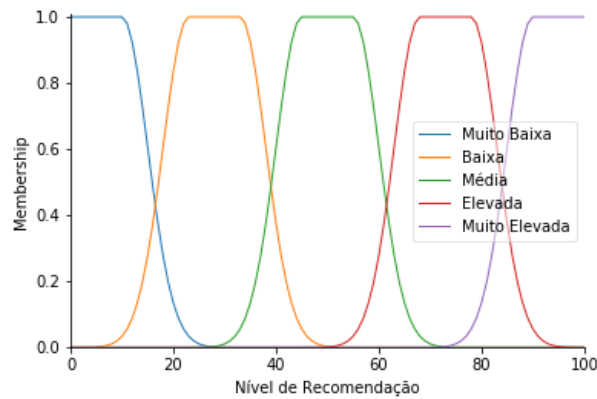


FIGURA 4.15: Funções pertença - Nível de Recomendação

Neste caso, a ideia principal foi a divisão em 5 conjuntos difusos distintos de forma a obter resultados mais diversificados. A divisão inicial foi feita de forma a que os conjuntos tivessem todos o mesmo intervalo, sendo posteriormente moldadas de forma a cumprir com a otimização do sistema difuso. Assim, se obtiveram os valores a, b, σ_1, σ_2 presentes na tabela 4.9.

Para facilitar a compreensão do valor final obtido nesta fase, seria ideal que o sistema devolvesse um valor entre 0 a 100 %. Notando-se que, pela particularidade de se estar a usar o método do centróide de desfuzzificação, aplicou-se a normalização dos valores de saída obtidos através da seguinte expressão:

$$r = \frac{n_i - n_{min}}{n_{max} - n_{min}} \times 100 \quad (4.1)$$

onde r será um valor de 0 a 100%, n_i o valor resultante da fase final do modelo adotado, n_{max} o valor máximo que se obteria do modelo e n_{min} o seu valor mínimo.

Esta transformação não é extremamente necessária, visto que os valores originais devolvidos pelo sistema funcionam como uma classificação, sendo que quanto maior o valor, maior a sua recomendação, no entanto, a familiaridade com os valores compreendidos entre 0 e 100 % tornam o resultado mais intuitivo.

Numa tomada de decisão, o utilizador deste sistema deverá analisar não só o valor final, mas também uma comparação dos valores das três dimensões, pois o valor final obtido não deverá ser o único elemento que determinará a seleção do melhor sistema.

4.5 Validação dos dados

A validação dos dados é necessária para otimizar a introdução de dados e, ao mesmo minimizar o risco de erros, pelo que foi efetuada neste trabalho com a intenção de validar a segunda fase do sistema. Esta foi feita substituindo as dimensões por valores de 0 a 100, em intervalos de 10. Posteriormente foram recolhidos os valores de recomendação resultantes da simulação usando essas combinações de valores (11 X 11 X 11 = 1331 registos).

Através da apresentação de gráficos tridimensionais desses valores de recomendação por cada valor fixo das diferentes dimensões (dimensão operacional, dimensão económica e dimensão ambiental), variando os valores das restantes dimensões não fixas, presentes no Anexo III, verifica-se que existe sempre um crescimento do nível de recomendação à medida que se aumenta cada uma das dimensões variáveis, notando-se também que entre os diferentes valores da dimensão operacional, económica e ambiental, os gráficos vão aumentando os seus máximos e mínimos à medida que se aumenta os valores destas dimensões.

Verifica-se ainda que, quando a dimensão operacional é fixa, o crescimento das outras dimensões não fixas (dimensão económica e ambiental), é de certa forma bastante uniforme, concluindo-se assim que ambas têm a mesma importância. No entanto, quando se fixa tanto a dimensão económica como a dimensão ambiental, se compararmos o crescimento das variáveis não fixas (dimensão operacional e ambiental, e dimensão operacional e económica, respetivamente), é possível verificar que a dimensão operacional tem um crescimento muito mais acentuado que qualquer uma das outras não fixas, pelo que se conclui que esta tem um peso/importância muito maior na tomada de decisão por parte do sistema difuso.

Capítulo 5

Aplicação do Sistema e Discussão dos Resultados Obtidos

Neste capítulo, serão apresentados e justificados todos os valores adotados nos diferentes sistemas para cada uma das características a avaliar (referidas no Capítulo 4), e será também efetuada uma discussão e análise dos resultados obtidos pelo SAD criado.

5.1 Aplicação dos dados

Relativamente às características onde não foi possível a obtenção de valores concretos, como foi o caso das variáveis potência, assinatura acústica, custos (aquisição, manutenção e operação), subprodutos e tamanho, é importante relembrar que foi elaborada uma escala de 0 a 10, onde os valores adotados nos diversos sistemas serão meramente qualitativos, resultado do estudo teórico elaborado e apoiados por um engenheiro da Divisão de Submarinos da Direção de Navios.

De referir ainda que as escalas estão parametrizadas para a realidade, de forma a facilitar uma futura adaptação do sistema com valores concretos. Ou seja, por exemplo, no caso da assinatura acústica, os valores concretos serão concebidos em decibéis (dB), pelo que quanto mais baixos forem os valores, melhor. O mesmo para todas as outras variáveis, excepto para a potência, onde resultado é contrário (quanto maior a potência, melhor).

É ainda importante realçar que, numa perspetiva de se analisar os diferentes sistemas, ir-se-á adotar os valores que correspondem ao pior cenário para cada variável de entrada, pois assim é estabelecido de forma coerente um método de comparação.

5.1.1 Eficiência

Para a variável eficiência, as células de combustível são capazes de auferir de uma eficiência que atinge valores superiores a 70% (Coates, 2014) (Milliken e Ruhl, 2002), o que acaba por ser relativamente bom, comparando com os outros 3 sistemas. No que toca aos motores de Stirling, estes auferem de uma eficiência de cerca de 40% (Coates, 2014) (Menon et al., 2020), as turbinas a vapor valores entre os 25 e os 30% (Coates, 2014) (Lus, 2001) e, por fim, os motores a Diesel com valores a rondar os 30 e os 35% (Lus, 2001). Portanto, quanto à eficiência, os valores a adotar serão:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 70%

MOTORES DE STIRLING – 40%

TURBINAS A VAPOR – 25%

MOTORES A DIESEL – 30%

5.1.2 Potência

No caso da potência, foi possível verificar através do estudo teórico que, dos quatro sistemas, o que apresenta maior potência é o sistema das turbinas a vapor, e o que apresenta menor potência é o sistema dos motores de Stirling. De entre os sistemas dos motores a Diesel e das células de combustível, é possível concluir que os motores a Diesel apresentam uma potência superior à das células de combustível. Logo, é possível verificar que: $P(\text{Turbinas}) > P(\text{Diesel}) > P(\text{Células}) > P(\text{Stirling})$. Desta forma, de modo a efetuar a comparação desta variável, adotar-se-ão os seguintes valores:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 3

MOTORES DE STIRLING – 2

TURBINAS A VAPOR – 8

MOTORES A DIESEL – 6

5.1.3 Assinatura Acústica

Tendo em conta o conhecimento adquirido através da investigação teórica, que se baseou sobretudo nas descrições teóricas dos diversos sistemas por parte de engenheiros navais embarcados em submarinos, foi possível concluir que o sistema menos ruidoso é claramente o das células de combustível, visto ser um sistema que

trabalha somente através de reações químicas, onde o ruído que apresenta é quase nulo. Em contraste, temos os outros três sistemas que através do seu funcionamento, criam uma grande quantidade de ruído proveniente das suas partes móveis. No entanto os motores a Diesel sobressaem ao nível do ruído devido às explosões que ocorrem no seu motor. As turbinas a vapor também apresentam um ruído bastante elevado, proveniente da rotação da própria turbina, mas comparativamente aos motores a Diesel, é considerado muito menos ruidoso. Por fim, os motores de Stirling também apresentam algum ruído proveniente do funcionamento das suas partes móveis (ênbolos), no entanto muito inferior às turbinas.

A partir desta avaliação, serão adotados os seguintes valores:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 1

MOTORES DE STIRLING – 3

TURBINAS A VAPOR – 7

MOTORES A DIESEL – 9

5.1.4 Custo de aquisição

Relativamente ao custo de aquisição, foi possível deduzir que tanto as células de combustível como as turbinas a vapor são ambos sistemas bastante complexos e que exigem infraestruturas bastante desenvolvidas e adequadas às suas necessidades específicas, pelo que os custos da sua aquisição se tornam bastante elevados (mesma ordem de grandeza) em comparação com os outros dois sistemas (motores a Diesel e motores de Stirling). Os motores a Diesel são considerados muito menos complexos que os motores de Stirling, pelo que o seu custo de aquisição será também inferior.

Após esta avaliação, serão então adotados os seguintes valores:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 8

MOTORES DE STIRLING – 5

TURBINAS A VAPOR – 8

MOTORES A DIESEL – 3

5.1.5 Custo de Manutenção

Através das conclusões retiradas do estudo efetuado, foi possível verificar que as rotinas de manutenção das células de combustível são muito menores comparativamente com os motores a Diesel, motores de Stirling e turbinas a vapor. No entanto, as células de combustível têm um ciclo de vida inferior aos demais, o que obriga à substituição de muitos dos componentes internos, o que acarreta custos algo elevados. Por esse motivo, o custo de manutenção é equiparado aos motores a Diesel. Quanto aos outros sistemas, dada a corrosão e contaminação a que são expostos, o seu ciclo de manutenção é muito maior, no entanto as turbinas a vapor sobressaem relativamente a ambos os motores. Dada a complexidade dos motores de Stirling comparativamente aos motores a Diesel, estes adquirem também um custo de manutenção mais elevado.

Desta forma, de modo a efetuar a comparação desta variável, adotar-se-ão os seguintes valores:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 5

MOTORES DE STIRLING – 6

TURBINAS A VAPOR – 8

MOTORES A DIESEL – 5

5.1.6 Custo de Operação

Quanto ao custo de operação, foi possível aferir que as células de combustível contêm um custo muito mais elevado comparativamente aos motores a Diesel e aos motores de Stirling, pois estas para gerar energia, utilizam dois componentes essenciais - O_2 e H_2 – onde para o componente H_2 , o seu custo de operação, armazenamento e reabastecimento, em comparação com o do diesel, é bastante mais elevado. No caso das turbinas a vapor, o uso de metanol/etanol e o seu elevado consumo, põe o seu custo de operação na mesma ordem de grandeza que a das células de combustível. A partir desta avaliação, utilizar-se-ão os seguintes valores:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 7

MOTORES DE STIRLING – 3

TURBINAS A VAPOR – 7

MOTORES A DIESEL – 3

5.1.7 Emissão Térmica

Através da teoria por detrás do funcionamento dos diferentes sistemas, foi possível a obtenção de dados concretos ($^{\circ}\text{C}$).

Para as células de combustível, as temperaturas provenientes do seu funcionamento, variam entre os 50 e os 1000 $^{\circ}\text{C}$ (Lus, 2001), no entanto, para efeitos de comparação irá ser utilizado os valores correspondentes às células de combustível existentes nos submarinos da classe *Tridente* – as células de membrana de permuta protónica. Assumindo isso, estas células atingem temperaturas de funcionamento a rondar os 80 $^{\circ}\text{C}$ (Coates, 2014). Relativamente aos motores de Stirling, estes atingem temperaturas de funcionamento a rondar os 500 $^{\circ}\text{C}$ (Sripakagorn e Srikam, 2011), as turbinas a vapor valores a rondar os 700 $^{\circ}\text{C}$ (Lus, 2019) e os motores a Diesel valores a rondar os 500 $^{\circ}\text{C}$ (Proctor e Armstrong, 2021). Ou seja, os valores a adotar serão:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 80 $^{\circ}\text{C}$

MOTORES DE STIRLING – 500 $^{\circ}\text{C}$

TURBINAS A VAPOR – 700 $^{\circ}\text{C}$

MOTORES A DIESEL – 500 $^{\circ}\text{C}$

5.1.8 Subproduto

Relativamente às células de combustível, o subproduto resultante das suas reações químicas, é somente água destilada, o que é bastante bom e benéfico em termos de estabilidade (regulação do peso) pois acaba por compensar o consumo dos combustíveis utilizados (H_2 e O_2), ou seja, é compensada a perda dos reagentes com o seu subproduto resultante. Na prática, essa água destilada tem que depois ser expelida. Se esta prejudica o ambiente? Sim, mas o impacto é bastante reduzido (praticamente nulo). Quanto aos outros 3 sistemas, o seu subproduto predominante resultante é coincidente: CO_2 . Este sendo um dos gases mais poluentes, necessita de ser expelido para o mar, perturbando desta forma o meio ambiente envolvente. A partir desta avaliação, utilizar-se-ão os seguintes valores:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 1

MOTORES DE STIRLING – 8

TURBINAS A VAPOR – 8

MOTORES A DIESEL – 8

5.1.9 Tamanho

Tanto as células de combustível como as turbinas a vapor são sistemas cuja sua implementação é bastante complexa, devido sobretudo às dimensões do próprio sistema, no caso das turbinas a vapor, e devido aos sistemas adjacentes que estes implicam, no caso das células de combustível. Relativamente aos motores de Stirling, estes também albergam alguma complexidade, no entanto esta é colmatada com a adição de um módulo único à estrutura do próprio submarino. O sistema cuja implementação é menos complexa corresponde aos motores a Diesel.

A partir desta avaliação, utilizar-se-ão os seguintes valores:

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL – 7

MOTORES DE STIRLING – 5

TURBINAS A VAPOR – 7

MOTORES A DIESEL – 3

De modo a resumir quais os valores a adotar em cada característica, para cada um dos sistemas, referidos no subcapítulo 5.1, é apresentada a seguinte tabela:

| Dimensão Operacional | | | |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Sistemas AIP | Eficiência (%) | Potência | Assinatura Acústica |
| Células de Combustível | 70 | 3 | 1 |
| Motores de Stirling | 40 | 2 | 3 |
| Turbinas a Vapor | 25 | 8 | 7 |
| Motores a Diesel | 30 | 6 | 9 |
| Dimensão Económica | | | |
| Sistemas AIP | Custo de Aquisição | Custo de Manutenção | Custo de Operação |
| Células de Combustível | 8 | 5 | 7 |
| Motores de Stirling | 5 | 6 | 3 |
| Turbinas a Vapor | 8 | 8 | 7 |
| Motores a Diesel | 3 | 5 | 3 |
| Dimensão Ambiental | | | |
| Sistemas AIP | Emissão Térmica (°C) | Subproduto | Tamanho |
| Células de Combustível | 80 | 1 | 7 |
| Motores de Stirling | 500 | 8 | 5 |
| Turbinas a Vapor | 700 | 8 | 7 |
| Motores a Diesel | 500 | 8 | 3 |

TABELA 5.1: Dados de entrada das características das dimensões operacional, económica e ambiental

5.2 Discussão dos resultados

De acordo com os valores referidos no subcapítulo 5.1, foi aplicado o sistema difuso apresentado no Capítulo 4. Nas secções seguintes, serão apresentados os graus de pertença de cada variável de entrada de cada uma das dimensões e respetiva classificação, bem como os resultados obtidos em cada uma das duas fases do sistema.

Para uma análise mais pormenorizada de cada um dos valores de saída de cada uma das fases do sistema, apresentam-se no Anexo III as regras que foram ativadas pelo sistema.

É ainda importante realçar que para finalizar o processo, ou seja, obter os *scores* finais do nível de recomendação, será efetuada a desfuzzificação das variáveis difusas, a qual se baseia no cálculo do centróide (3.12). Para além do *score* final do nível de recomendação para cada um dos sistemas, será também apresentado a normalização desse valor a partir da equação 4.1, com intuito de se obter um valor entre 0 e 100%.

5.2.1 Células de combustível

Dimensão Operacional

Relativamente à dimensão operacional das células de combustível, de acordo com os dados adotados na Tabela 5.1, é possível verificar que o sistema classificou a eficiência como sendo "Boa", a potência como sendo "Má" e a assinatura acústica como sendo maioritariamente "Muito Baixa", mas também podendo ser considerada apenas "Baixa", com um grau de pertença muito baixo (0,1).

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|---------------------|------------------|---------------|
| Eficiência | 1 | "Boa" |
| Potência | 1 | "Má" |
| Assinatura Acústica | 1 | "Muito Baixa" |
| | 0,1 | "Baixa" |

TABELA 5.2: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Células de combustível

Estas classificações ativaram as regras presentes no III, pelo que se obteve uma área resultante como ilustra a Figura 5.1. Assim, é possível verificar que a dimensão operacional obteve um *score* de 79.

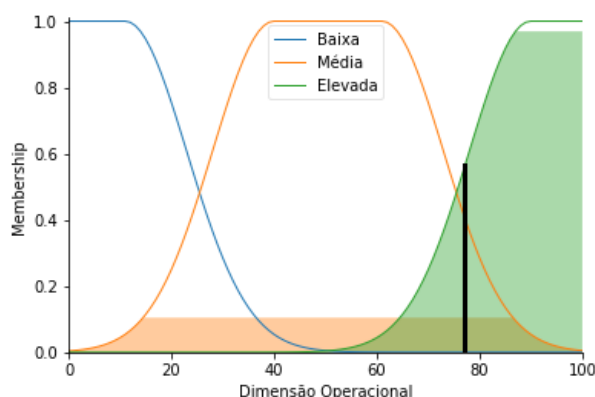


FIGURA 5.1: Conjunto difuso final da Dimensão Operacional das Células de Combustível

Dimensão Económica

Em relação à dimensão económica, é possível verificar que o sistema classificou o custo de aquisição como sendo "Alto" e também "Muito Alto", o custo de manutenção como sendo "Baixo" e também "Alto", e o custo de operação como sendo "Alto".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|---------------------|------------------|---------------|
| Custo de aquisição | 0,6 | "Alto" |
| | 0,4 | "Muito Alto" |
| Custo de manutenção | 0,6 | "Baixo" |
| | 0,4 | "Alto" |
| Custo de operação | 1 | "Alto" |

TABELA 5.3: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão económica - Células de combustível

Novamente, após ativadas as regras (II), obteve-se uma área resultante preenchida a colorido, como ilustra a Figura 5.2, pelo que se pode observar que a dimensão económica obteve um *score* de 42.

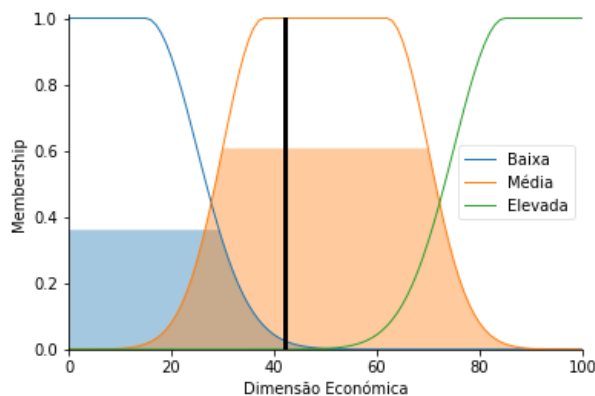


FIGURA 5.2: Conjunto difuso final da Dimensão Económica das Células de Combustível

Dimensão Ambiental

No que toca à dimensão ambiental, o sistema classificou a emissão térmica como sendo maioritariamente "Muito Baixa", mas também podendo ser considerada apenas "Baixa", com um grau de pertinência muito baixo (0,1); o subproduto como sendo maioritariamente "Pouco Poluente", mas também podendo ser considerado "Poluente", com um grau de pertinência muito baixo (0,1); e o tamanho como sendo "Alto".

| Características | Grau de pertinência | Classificação |
|-----------------|---------------------|------------------|
| Emissão Térmica | 1 | "Muito Baixa" |
| | 0,1 | "Baixa" |
| Subproduto | 1 | "Pouco Poluente" |
| | 0,1 | "Poluente" |
| Tamanho | 1 | "Alto" |

TABELA 5.4: Grau de pertinência e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Células de combustível

Ativando as respetivas regras (II), obteve-se uma área resultante, como ilustrado a Figura 5.3. Verifica-se então que a dimensão ambiental obteve um *score* de 79.

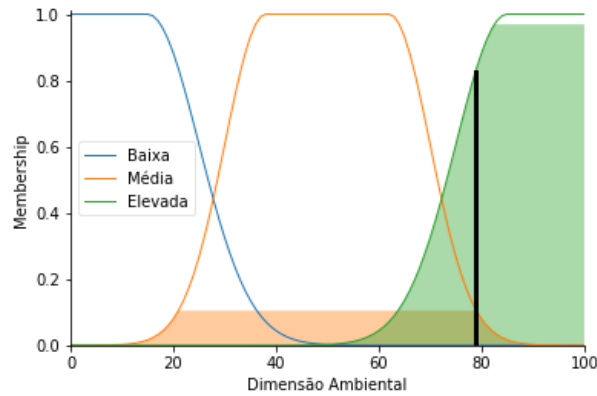


FIGURA 5.3: Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental das Células de Combustível

Nível de Recomendação

Tendo em conta os *scores* alcançados em cada uma das dimensões atrás referidas (79, 42 e 79 respetivamente) é possível aferir que cada uma delas obteve as seguintes classificações:

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|----------------------|------------------|---------------|
| Dimensão Operacional | 0,8 | "Elevada" |
| | 0,1 | "Média" |
| Dimensão Económica | 1 | "Média" |
| Dimensão Ambiental | 0,8 | "Elevada" |
| | 0,1 | "Média" |

TABELA 5.5: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Células de combustível

Novamente, foram ativadas as respetivas regras (II), obtendo-se assim a área resultante ilustrada a Figura 5.4, onde o nível de recomendação das células de combustível atingiu um nível "Elevado", com um *score* obtido de 80.

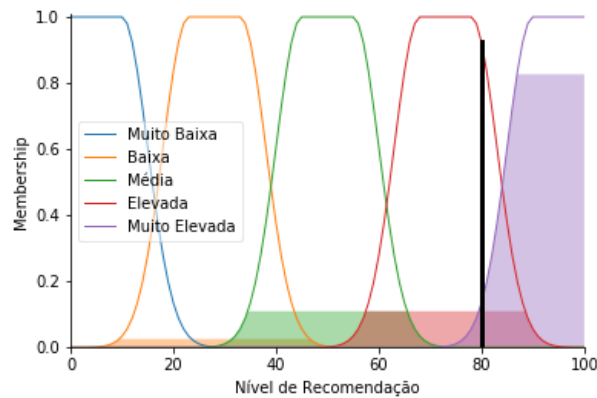


FIGURA 5.4: Conjunto difuso final do Nível de Recomendação das Células de Combustível

Para melhor se compreender o *score* final obtido (80), foi efetuada a normalização desse valor a partir da equação 4.1, pelo que se pode concluir que o sistema de células de combustível obteve um nível de recomendação de 86%.

5.2.2 Motores de Sirling

Dimensão Operacional

No que toca à dimensão operacional dos motores de Stirling, de acordo com os dados adotados na Tabela 5.1, é possível verificar que o sistema classificou a eficiência como sendo "Má", a potência como sendo "Má" e também "Muito Má", e a assinatura acústica como sendo "Baixa".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|---------------------|------------------|---------------|
| Eficiência | 1 | "Má" |
| Potência | 0,7 | "Má" |
| | 0,3 | "Muito Má" |
| Assinatura Acústica | 1 | "Baixa" |

TABELA 5.6: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Motores de Stirling

Pelas regras ativadas pelas classificações anteriores, obteve-se uma área resultante colorida a laranja, como ilustra a Figura 5.5, onde se observa que a dimensão operacional um *score* de 50.

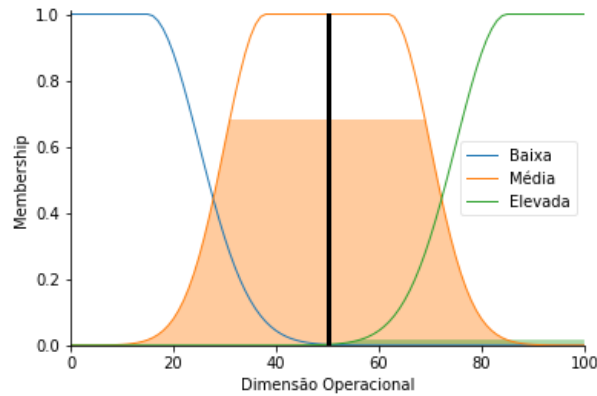


FIGURA 5.5: Conjunto difuso final da Dimensão Operacional dos Motores de Stirling

Dimensão Económica

Em relação à dimensão económica, é possível verificar que o sistema classificou o custo de aquisição como sendo "Alto" e também "Baixo", o custo de manutenção como sendo maioritariamente "Alto", mas também podendo ser considerado como "Baixo", com um grau de pertença muito baixo (0,1); e o custo de operação como sendo "Baixo".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|---------------------|------------------|---------------|
| Custo de aquisição | 0,6 | "Baixo" |
| | 0,4 | "Alto" |
| Custo de manutenção | 1 | "Alto" |
| | 0,1 | "Baixo" |
| Custo de operação | 1 | "Baixo" |

TABELA 5.7: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão económica - Motores de Stirling

Novamente, após ativadas as regras (II), obteve-se uma área resultante preenchida a colorido, como ilustra a Figura 5.6, onde a dimensão económica obteve um *score* de 50.

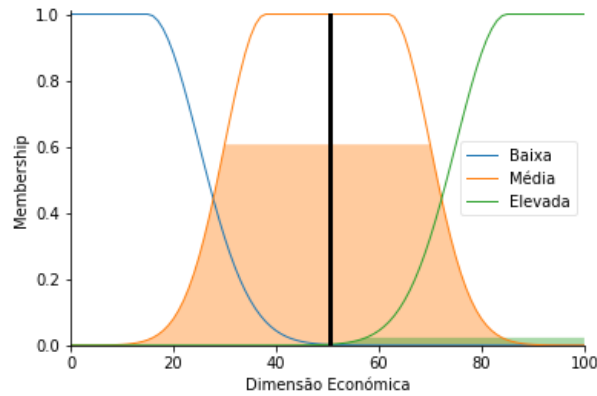


FIGURA 5.6: Conjunto difuso final da Dimensão Económica dos Motores de Stirling

Dimensão Ambiental

No que toca à dimensão ambiental, o sistema classificou a emissão térmica como sendo maioritariamente "Alta", mas podendo também ser considerada "Baixa", com um grau de pertença muito baixo (0,2); o subproduto como sendo "Muito Poluente" e também "Extremamente Poluente" e o tamanho como sendo "Baixo".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|-----------------|------------------|-------------------------|
| Emissão Térmica | 0,9 | "Alta" |
| | 0,2 | "Baixa" |
| Subproduto | 0,6 | "Muito Poluente" |
| | 0,4 | "Extremamente Poluente" |
| Tamanho | 1 | "Baixo" |

TABELA 5.8: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Motores de Stirling

Ativando as respetivas regras (II), obteve-se uma área resultante, como ilustrado a Figura 5.7, onde a dimensão ambiental obteve um *score* de 42.

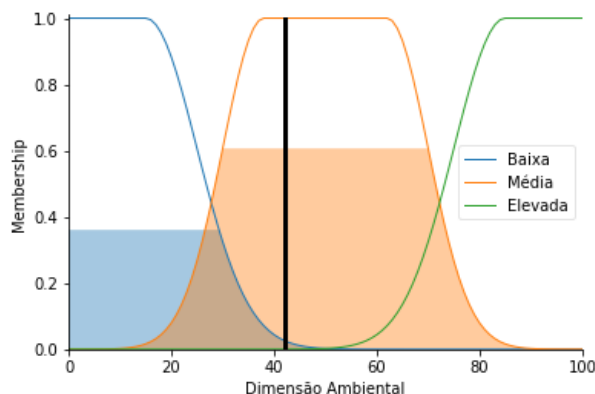


FIGURA 5.7: Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental dos Motores de Stirling

Nível de Recomendação

Tendo em conta os *scores* alcançados em cada uma das dimensões atrás referidas (50, 50 e 42 respetivamente) é possível aferir que cada uma delas obteve as seguintes classificações:

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|----------------------|------------------|---------------|
| Dimensão Operacional | 1 | "Média" |
| Dimensão Económica | 1 | "Média" |
| Dimensão Ambiental | 1 | "Média" |

TABELA 5.9: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Motores de Stirling

Novamente, foram ativadas as respetivas regras (II), obtendo-se assim a área resultante ilustrada na Figura 5.8, onde o nível de recomendação dos motores de Stirling atingiu o nível "Médio", onde o *score* obtido foi de 49. Através da normalização, o sistema obteve um nível de recomendação de 49%.

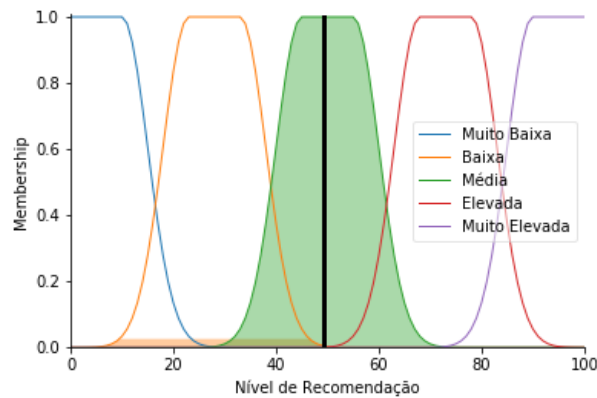


FIGURA 5.8: Conjunto difuso final do Nível de Recomendação dos Motores de Stirling

5.2.3 Turbinas a vapor

Dimensão Operacional

No que toca à dimensão operacional das turbinas a vapor, de acordo com os dados adotados na Tabela 5.1, é possível verificar que o sistema classificou a eficiência como sendo maioritariamente "Má", mas também como sendo "Muito Má", cujo grau de pertença é relativamente baixo (0,1); a potência como sendo "Boa" e também "Muito Boa", e a assinatura acústica como sendo "Alta".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|---------------------|------------------|---------------|
| Eficiência | 1 | "Má" |
| | 0,1 | "Muito Má" |
| Potência | 0,6 | "Boa" |
| | 0,4 | "Muito Boa" |
| Assinatura Acústica | 1 | "Alta" |

TABELA 5.10: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Turbinas a Vapor

Pelas regras ativadas pelas classificações anteriores, obteve-se uma área resultante colorida, como ilustra a Figura 5.9, onde é possível observar que a dimensão operacional atingiu um *score* de 48.

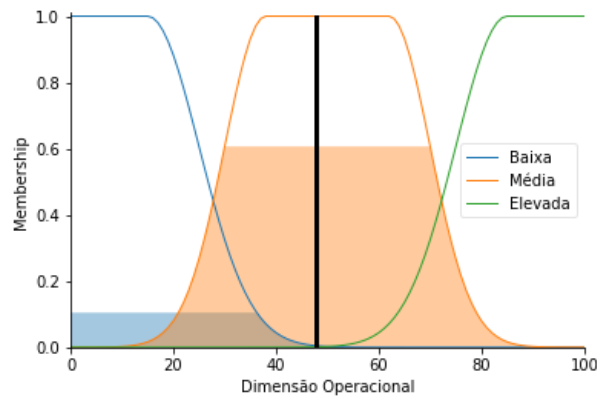


FIGURA 5.9: Conjunto difuso final da Dimensão Operacional das Turbinas a Vapor

Dimensão Económica

Em relação à dimensão económica, é possível verificar que o sistema classificou o custo de aquisição como sendo "Alto" e também "Muito Alto", o custo de manutenção como sendo "Alto" e também "Muito Alto", e o custo de operação como sendo "Alto".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|---------------------|------------------|---------------|
| Custo de aquisição | 0,6 | "Alto" |
| | 0,4 | "Muito Alto" |
| Custo de manutenção | 0,6 | "Alto" |
| | 0,4 | "Muito Alto" |
| Custo de operação | 1 | "Alto" |

TABELA 5.11: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão económica - Turbinas a Vapor

Novamente, após ativadas as regras (II), obteve-se uma área resultante preenchida a colorido, como ilustra a Figura 5.10, pelo que desta forma, é possível observar que a dimensão económica obteve um *score* de 42.

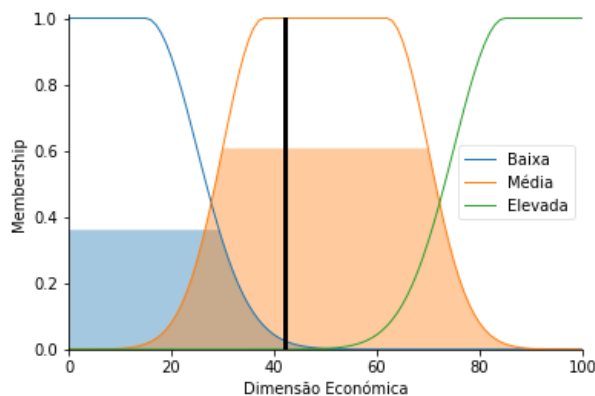


FIGURA 5.10: Conjunto difuso final da Dimensão Económica das Turbinas a Vapor

Dimensão Ambiental

No que toca à dimensão ambiental, o sistema classificou a emissão térmica como sendo "Alta" e também "Muito Alta", o subproduto como sendo "Muito Poluente" e também "Extremamente Poluente" e o tamanho como sendo "Alto".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|-----------------|------------------|-------------------------|
| Emissão Térmica | 0,6 | "Alta" |
| | 0,4 | "Muito Alta" |
| Subproduto | 0,6 | "Muito Poluente" |
| | 0,4 | "Extremamente Poluente" |
| Tamanho | 1 | "Alto" |

TABELA 5.12: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Turbinas a Vapor

Ativando as respetivas regras (II), obteve-se uma área resultante, como ilustrado a Figura 5.11, onde a dimensão ambiental atingiu um *score* de 16.

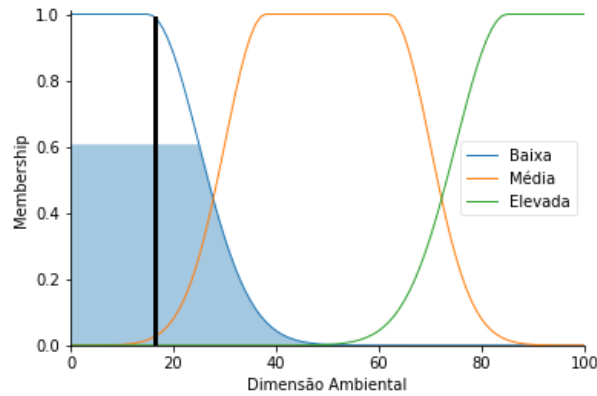


FIGURA 5.11: Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental das Turbinas a Vapor

Nível de Recomendação

Tendo em conta os *scores* alcançados em cada uma das dimensões atrás referidas (48, 42 e 16 respetivamente) é possível aferir que cada uma delas obteve as seguintes classificações:

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|----------------------|------------------|---------------|
| Dimensão Operacional | 1 | "Média" |
| Dimensão Económica | 1 | "Média" |
| Dimensão Ambiental | 1 | "Baixa" |

TABELA 5.13: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Turbinas a Vapor

Foram então ativadas as respetivas regras (II), obtendo-se assim a área resultante ilustrada a Figura 5.12, onde o nível de recomendação das turbinas a vapor atingiu um nível "Baixo", com um *score* de 29. Normalizando o valor obtido, o sistema obteve então um nível de recomendação de 24%.

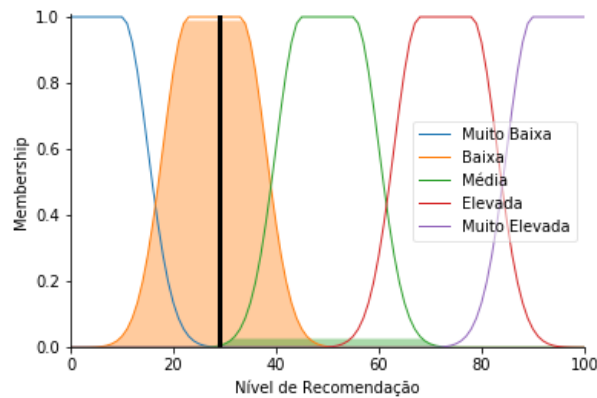


FIGURA 5.12: Conjunto difuso final do Nível de Recomendação das Turbinas a Vapor

5.2.4 Motores a Diesel

Dimensão Operacional

No que toca à dimensão operacional dos motores a Diesel, de acordo com os dados adotados na Tabela 5.1, é possível verificar que o sistema classificou a eficiência como sendo "Má", a potência como sendo maioritariamente "Boa", mas também sendo "Má", onde o grau de pertença é muito baixo (0,1); e a assinatura acústica como sendo maioritariamente "Muito Alta", mas também "Alta", onde o grau de pertença é também muito baixo (0,2).

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|---------------------|------------------|---------------|
| Eficiência | 1 | "Má" |
| Potência | 1 | "Boa" |
| Assinatura Acústica | 0,1 | "Má" |
| | 1 | "Muito Alta" |
| | 0,2 | "Alta" |

TABELA 5.14: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão operacional - Motores a Diesel

Pelas regras ativadas pelas classificações anteriores, obteve-se uma área resultante colorida, como ilustra a Figura 5.13, onde a dimensão operacional atingiu um *score* de 18.

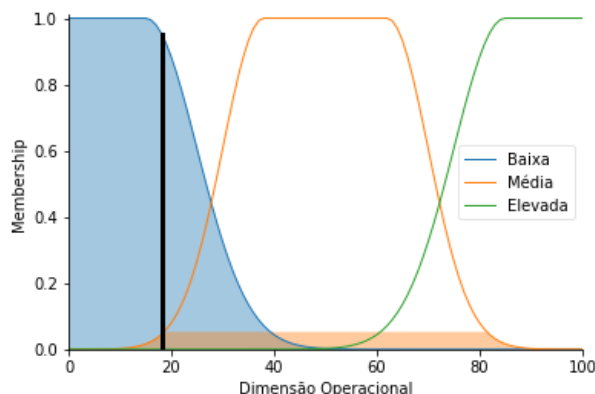


FIGURA 5.13: Conjunto difuso final da Dimensão Operacional dos Motores a Diesel

Dimensão Económica

Em relação à dimensão económica, é possível verificar que o sistema classificou o custo de aquisição como sendo "Baixo", o custo de manutenção como sendo "Baixo" e também "Alto", e o custo de operação como sendo "Baixo".

| Características | Grau de pertinência | Classificação |
|---------------------|---------------------|---------------|
| Custo de aquisição | 1 | "Baixo" |
| Custo de manutenção | 0,6 | "Baixo" |
| | 0,4 | "Alto" |
| Custo de operação | 1 | "Baixo" |

TABELA 5.15: Grau de pertinência e respetiva classificação referentes à dimensão económica - Motores a Diesel

Novamente, após ativadas as regras (II), obteve-se uma área resultante preenchida a colorido, como ilustra a Figura 5.14, onde a dimensão económica atingiu um *score* de 50.

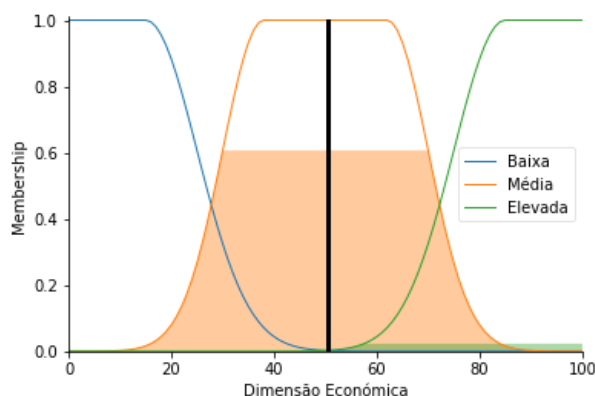


FIGURA 5.14: Conjunto difuso final da Dimensão Económica dos Motores a Diesel

Dimensão Ambiental

No que toca à dimensão ambiental, o sistema classificou a emissão térmica como sendo maioritariamente "Alta", mas também como sendo "Baixa", com o grau de pertença muito baixo (0,2); o subproduto como sendo "Muito Poluente" e também "Extremamente Poluente" e o tamanho como sendo "Baixo".

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|-----------------|------------------|-------------------------|
| Emissão Térmica | 0,9 | "Alta" |
| | 0,2 | "Baixa" |
| Subproduto | 0,6 | "Muito Poluente" |
| | 0,4 | "Extremamente Poluente" |
| Tamanho | 1 | "Baixo" |

TABELA 5.16: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à dimensão ambiental - Motores a Diesel

Ativando as respetivas regras (II), obteve-se uma área resultante, como ilustrado a Figura 5.15, onde a dimensão ambiental obteve um *score* de 50.

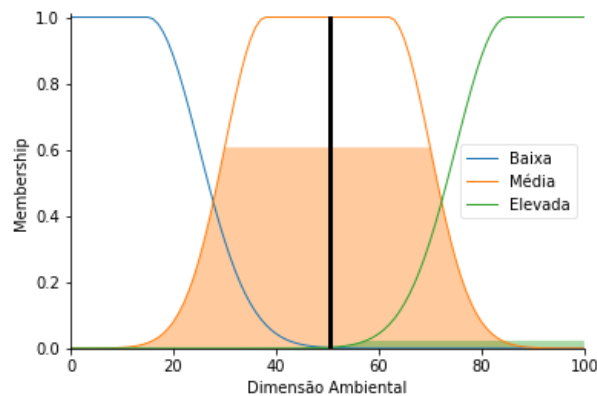


FIGURA 5.15: Conjunto difuso final da Dimensão Ambiental dos Motores a Diesel

Nível de Recomendação

Tendo em conta os *scores* alcançados em cada uma das dimensões atrás referidas (18, 50 e 50 respetivamente) é possível aferir que cada uma delas obteve as seguintes classificações:

| Características | Grau de pertença | Classificação |
|----------------------|------------------|---------------|
| Dimensão Operacional | 1 | "Baixa" |
| Dimensão Económica | 1 | "Média" |
| Dimensão Ambiental | 1 | "Baixa" |

TABELA 5.17: Grau de pertença e respetiva classificação referentes à recomendação - Motores a Diesel

Foram então ativadas as respetivas regras lógicas (II), obtendo-se assim a área resultante ilustrada a Figura 5.16, pelo que o nível de recomendação dos motores a Diesel atingiu um nível "Baixo", com um *score* de 29. Após a normalização (4.1), o sistema obteve um nível de recomendação de 24%.

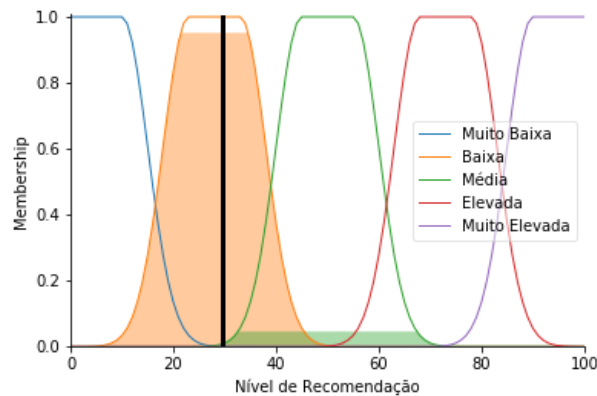


FIGURA 5.16: Conjunto difuso final do Nível de Recomendação dos Motores a Diesel

De modo a resumir todos os *scores* das dimensões e níveis de recomendação alcançados pelos diferentes sistemas, e respetiva normalização, observe-se a seguinte tabela:

| Sistema AIP | Operacional | Económica | Ambiental | Recomendação | (%) |
|------------------------|-------------|-----------|-----------|--------------|-----|
| Células de combustível | 79 | 42 | 79 | 80 | 86 |
| Motores de Stirling | 50 | 50 | 42 | 49 | 49 |
| Turbinas a Vapor | 48 | 42 | 16 | 29 | 24 |
| Motores a Diesel | 18 | 50 | 50 | 29 | 24 |

TABELA 5.18: Resultados finais obtidos

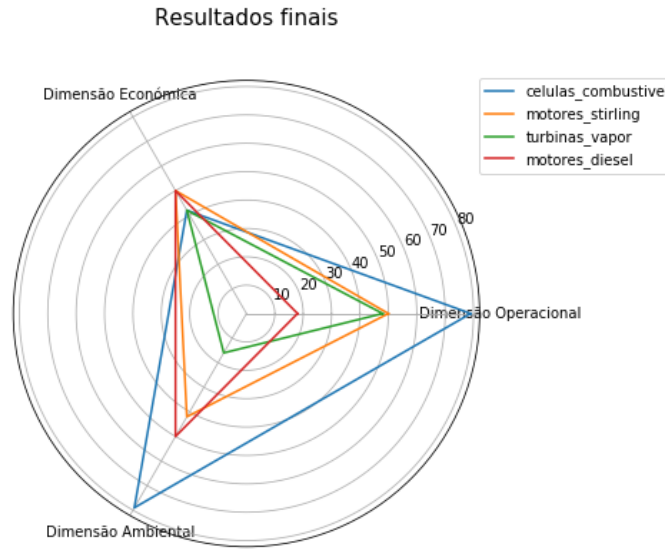


FIGURA 5.17: *Starplot* - Resultados finais

Através da Figura 5.17, é possível verificar que as células de combustível sobressaem relativamente aos restantes sistemas, visto que atinge valores muito mais elevados a nível operacional (sendo bastante eficiente e um ruído praticamente nulo em funcionamento) e também a nível ambiental (poluição quase nula).

É importante referir que para este SAD não importa somente o valor da recomendação final, mas também a comparação entre os valores das respectivas dimensões, para um melhor apoio ao decisor na hora da decisão. Visto que as células de combustível são consideradas o sistema de eleição por uma margem bastante grande, pode não parecer importante fazer esta análise. No entanto, no futuro, outros sistemas poderão aparecer e a decisão poderá não ser tão óbvia. Para tal, a criação de um sistema de duas fases não só auxilia devolvendo um valor de recomendação, mas também dimensiona os sistemas ao nível operacional, económico e ambiental, tornando a comparação mais detalhada.

De forma a comparar os valores obtidos pelo sistema difuso apresentado com uma aplicação linear e não difusa, foi aplicada uma equação com os pesos obtidos nos questionários (B) apenas para o nível de recomendação (R), onde foram utilizados os valores adquiridos pelo sistema nessa primeira fase normalizados (4.1), tanto para a dimensão operacional (x), como para a dimensão económica (y) e para a dimensão ambiental (z). Desta forma, obtiveram-se os seguintes resultados:

$$R = \frac{(4.81 * x + 3.43 * y + 3.19 * z)}{11.43} \quad (5.1)$$

| Sistema AIP | Resultados programa (%) | Resultados confirmação (%) |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Células de combustível | 86 | 80 |
| Motores de Stirling | 49 | 46 |
| Turbinas a Vapor | 24 | 28 |
| Motores a Diesel | 24 | 27 |

TABELA 5.19: Nível de Recomendação - Pesos

Através da comparação de ambos os resultados obtidos, é possível verificar não ficaram muito distantes uns dos outros.

Apesar de os valores obtidos não serem nada dispares, neste trabalho optou-se pela utilização de um modelo difuso em detrimento da aplicação linear, devido a este permitir dar ao SAD uma maior flexibilidade e variabilidade, por meio da atribuição de um grau de pertença sem limites específicos para as diversas dimensões. Este permite ainda a inclusão de avaliações humanas vagas em problemas de computação, fornecendo um meio eficaz para a resolução de problemas, tornando mais fácil a sua perceção e representando uma abordagem muito mais intuitiva.

Conclusão

Considerações Finais

É bastante notável que os sistemas AIP afetam de forma decisiva a capacidade operacional de um submarino, na medida em que permitem melhorar a discrição dos submarinos, prolongando a capacidade da operar em imersão elétrica. Permitem, na prática, a aproximação dos submarinos convencionais às capacidades dos submarinos nucleares, na perspetiva da necessidade de abandonar as melhores cotas de operação para ter que recarregar as baterias à cota periscópica, apresentando ainda como vantagens, a menor dimensão e o menor ruído irradiado face aos submarinos nucleares, constituindo assim uma grande e relevante força estratégica para um país como Portugal.

Neste trabalho foi desenvolvido um SAD que tem o objetivo de auxiliar na escolha de qual o sistema AIP mais adequado a adotar nos submarinos portugueses. Foi aplicado o sistema difuso a duas fases e também a respetiva validação, onde se compararam os quatro sistemas AIP, designadamente as células de combustível, os motores de ciclo Stirling, as turbinas a vapor de ciclo fechado e os motores a Diesel de circuito fechado, obtendo-se para as células de combustível, o nível de recomendação mais elevado de entre os restantes sistemas, com uma recomendação de cerca de 86 %. Seguiram-se os motores de ciclo Stirling com uma recomendação de 49 % e as turbinas a vapor de ciclo fechado e os motores a Diesel de circuito fechado, ambos com 24 %.

O sistema a duas fases foi bastante vantajoso para o estudo, pois não só permitiu obter um nível de recomendação, como também uma comparação ao nível das três dimensões mais importantes, onde foi possível inferir que o sistema de células de combustível sobressai pela positiva relativamente aos restantes sistemas, visto que alberga uma grande vantagem operacional (sendo bastante mais eficiente e tendo um ruído praticamente nulo em funcionamento) e ambiental (com uma poluição quase nula).

O presente trabalho permitiu cumprir com o seu objetivo, auxiliando na decisão de qual o sistema a adotar perante variáveis difusas. Cumpre também com o objetivo de se poder adaptar a outros sistemas que tenham de ser analisados no futuro.

Limitações Encontradas

A principal limitação encontrada passou sobretudo pela incapacidade de adquirir informação mais técnica, nomeadamente valores concretos para as diversas características avaliadas, dada a natureza confidencial da temática. No entanto, esta foi minimizada graças ao profundo conhecimento recolhido junto dos engenheiros da Divisão de Submarinos da Direção de Navios da Marinha.

Para colmatar também esta limitação, foi criado um sistema moldável, ou seja, este pode facilmente ser reajustado e moldado por quem realizar institucionalmente um futuro estudo nesta matéria, uma vez obtida a informação necessária junto dos construtores e fornecedores, adquirindo desta forma dados concretos.

Projetos Futuros

A realização desta dissertação abriu portas a novos estudos, nomeadamente para estudos com uma vertente mais técnica, por exemplo, relacionadas com a estabilidade dos submarinos aquando da aquisição deste tipo de sistemas, visto que este aspeto não foi explorado nesta dissertação.

Considerando ainda os recentes progressos em matéria de baterias, com maior capacidade e menores dimensões comparativamente com as atuais baterias de ácido de chumbo, que tradicionalmente equipam os submarinos convencionais, seria interessante estudar a possibilidade de corresponder aos requisitos operacionais estabelecidos pela Marinha para os seus submarinos, com recurso apenas à conjugação de um sistema AIP e bateria, ou seja, sem geradores.

Bibliografia

- Al-Kasasbeh, R. et al. (2013). Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 16(3), 302–313.
- Arquivo da Direção de Navios - Divisão de Submarinos. (s.d.).
- Ashaghi, A. et al. (2012). Thermodynamics performance analysis of solar stirling engines. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 1–4.
- Azevedo, D. (2013). *Conceito de Operação dos Veículos Submarinos Autónomos Se-a-Con a partir dos Submarinos da Classe Tridente* (tese de mestrado). Escola Naval. Lisboa.
- Barbalho, V. (2001). Sistemas baseados em conhecimento e lógica difusa para simulação do processo chuva-vazão. *Thesi (PhD in Civil Engeneering)*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Barbir, F. (2013). *PEM fuel cells: theory and practice* (2^a ed.). Elsevier.
- Barreto, J. (2017). *Primeira Esquadilha de Submarinos* (tese de mestrado). Escola Naval. Lisboa.
- BBC. (2014). Cornelius Drebbel (1572 - 1633). http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/drebbel_cornelis.shtml (Acedido em janeiro de 2021)
- Beljkas, Z. et al. (2019). Application of Fuzzy Logic on Selection of Contractors for Construction of High Rise Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 222(1), 012021.
- Bojadziev, G. & Bojadziev, M. (2007). *Fuzzy logic for business, finance, and management* (Vol. 23). World Scientific.
- Bovis, A. (2016). La Technologie des Sous-Marins. *Sub-Marine*, 53–66.
- Caravana, L. (2004). Portugal vai continuar a dispor de capacidade submarina. *Revista da Armada*, 20–21.
- Coates, P. (2014). *Submarine Matters: Air Independent Propulsion (AIP) Technologies and Selection*. <http://gentle seas.blogspot.com/2014/08/air-independent-propulsion-aip.html> (Acedido em março de 2021)
- Correia, A. D. (2007). O futuro com energias alternativas. *Revista da Armada*, 10–13.

- Costa, S. (2018). *Controlo do tipo Takagi-Sugeno Difuso Robusto em sistemas não lineares não afins* (tese de mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Delgado, M. (2002). *Projeto Automático de Sistemas Nebulosos: Uma Abordagem Co-Evolutiva* (tese de doutoramento). Universidade Estadual de Campinas. São Paulo.
- Dingemanse, R. P. (2019). Alternative Power Sources for Submarines. *SWZ - Maritime magazine*. <https://www.rhmarine.com/media/129298/alternative-power-sources-for-submarines-rh-marine.pdf>. (Acedido em março de 2021)
- Fernandes, M. (2016). A arma submarina na estratégia alemã na Primeira Guerra Mundial. *Nação e Defesa*, 133–150.
- Fuzzy Logic Membership Function. (2015). <http://researchhubs.com/post/engineering/fuzzy-system/fuzzy-membership-function.html> (Acedido em abril de 2021)
- GeeksforGeeks. (2020). *Comparison Between Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference System*. <https://www.geeksforgeeks.org/comparison-between-mamdani-and-sugeno-fuzzy-inference-system/> (Acedido em maio de 2021)
- Gelu, T. A. (2014). *Analysis of Stirling engine and comparison with other technologies using low temperature heat sources* (tese de mestrado). Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Gidi. (s.d.). *Cornelius Van Drebbel (1572-1633) and The First Submarine*. <http://www.submarinesonstamps.co.il/History.aspx?h=27> (Acedido em janeiro de 2021)
- Gonçalves, D. (2016). *Implementação e Validação de Interfaces de Reconhecimento Gestual para Utilização em Cirurgias de Invasão Mínima* (tese de mestrado). Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Harper, G. (2008). *Fuel Cell - Projects for the Evil Genius*. McGraw-Hill.
- História do Submarino. (2016). <https://www.historiadetudo.com/submarino> (Acedido em janeiro de 2021)
- Ireland, B. (2003). *Battle of the atlantic*. Pen & Sword Books.
- Ivanqui, J. (2005). *Esteira eletrônica com velocidade controlada por lógica fuzzy* (tese de mestrado). Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Curitiba.
- Jantzen, J. (2013). *Foundations of fuzzy control: a practical approach* (2^a ed.). John Wiley & Sons.
- Kaur, A. & Kaur, A. (2012). Comparison of mamdani-type and sugeno-type fuzzy inference systems for air conditioning system. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2(2), 323–325.

- Kerros, P., Inizan, C. & Grousset, D. (1994). MESMA: AIP system for submarines. *Proceedings of OCEANS'94*, 3, III-457.
- Klir, G. J. & Yuan, B. (1996). Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. *Possibility Theory versus Probab. Theory*, 32(2), 207–208.
- Kohagura, T. (2007). *Lógica Fuzzy e suas aplicações*. <https://pt.slideshare.net/IgorBulhes/teoria-fuzzy> (Acedido em abril de 2021)
- Kordesch, K. & Simader, G. (1996). *Fuel cells and their applications*. Wiley-VCH.
- Korol, T. (2012). *Fuzzy logic in financial management*. INTECH Open Access Publisher.
- Lus, T. (2001). Submarine hybridpropulsion systems. *Journal of KONES*, 8(1-2), 265–270.
- Lus, T. (2019). Waiting for Breakthrough in Conventional Submarine's Prime Movers. *Transactions on Maritime Science*, 8(01), 37–45.
- Maier, C. et al. (2007). Stirling engine. *University of Gavle*.
- Mandani, E. H. (1976). Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*, 8(6), 669–678.
- Mandani, E. H. & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1–13.
- Mean of Maximum (MoM) (PID and Fuzzy Logic Toolkit)*. (2012). https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370401J-01/lvpidmain/mean_of_max/ (Acedido em maio de 2021)
- Menon, R. R., Vijayakumar, R. & Pandey, J. (2020). Selection of Optimal Air Independent Propulsion System using Forced Decision Matrix. *Defence Science Journal*, 70(1), 103–109.
- Milliken, C. E. & Ruhl, R. C. (2002). Low cost, high efficiency reversible fuel cell systems. *Proceedings of the 2002 US DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-610-32405*, 1–14.
- Motor Stirling*. (s.d.). <https://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co/Images/MotorStirling-Ciclo.png> (Acedido em março de 2021)
- of Energy, U. S. D. (s.d.). *Hydrogen Storage*. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (Acedido em março de 2021)
- Proctor, C. L. & Armstrong, L. V. H. (2021). *Diesel engine*. <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine> (Acedido em abril de 2021)
- Questão 121*. (2017). <https://descomplica.com.br/gabarito-enem/questoes/2017-segunda-aplicacao/segundo-dia/rudolf-diesel-patenteou-um-motor->

- [combustao-interna-de-elevada-eficiencia-cujo-ciclo-esta/](#) (Acedido em março de 2021)
- Revankar, S. T. & Majumdar, P. (2014). *Fuel cells: principles, design, and analysis*. CRC press.
- Sá, A. (2020). *Classe submarinos Tridente faz dez anos ao serviço de Portugal*. <https://agriculturaemar.com/classe-submarinos-tridente-faz-dez-anos-ao-servico-de-portugal/> (Acedido em março de 2021)
- Samanta, D. (s.d.). *Defuzzification Techniques*. <https://cse.iitkgp.ac.in/~dsamanta/courses/archive/sca/Archives/Chapter%5C%205%5C%20Defuzzification%5C%20Methods.pdf> (Acedido em maio de 2021)
- Santos, G. (2014). *Lógica Fuzzy: uma aplicação na área da saúde* (tese de mestrado). Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis.
- Sheldon, S. & Zadeh, L. A. (1972). On fuzzy mapping and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (1), 30–34.
- Silva, F. (2011). *Desvendando a lógica difusa* (tese de mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- skfuzzy 0.2 docs*. (s.d.). <https://pythonhosted.org/scikit-fuzzy/> (Acedido em maio de 2021)
- Sousa, A. (2014). *Controladores Linguísticos Fuzzy* (tese de mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.
- Spiegel, D. C. (2017). *History of Fuel Cells*. <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/history-of-fuel-cells> (Acedido em março de 2021)
- Sripakagorn, A. & Srikam, C. (2011). Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. *Renewable Energy*, 36(6), 1728–1733.
- Stojić, G. (2012). Using fuzzy logic for evaluating the level of countries’(regions’) economic development. *Panoeconomicus*, 59(3), 293–310.
- submarino. (s.d.). [https://www.infopedia.pt/%5C\\$submarino](https://www.infopedia.pt/%5C$submarino) (Acedido em fevereiro de 2021)
- Takagi, T. & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1), 116–132.
- Thornton, G. B. (1994). *A design tool for the evaluation of atmosphere independent propulsion in submarines* (rel. téc.). Massachusetts Inst. of Tech. Cambridge Dept. of Ocean Engineering.
- Tsukamoto, Y. et al. (1979). An approach to fuzzy reasoning method. *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, 137–149.
- Tupper, E. & Rawson, K. (2001). *Basic Ship Theory Volume 2* (Vol. 2). Elsevier.

- turbinas a vapor. (s.d.). [https://www.infopedia.pt/%5C\\$turbina-a-vapor](https://www.infopedia.pt/%5C$turbina-a-vapor) (Acedido em março de 2021)
- Vista, B. B. (2010). *Submarinos da Classe Tridente*. <https://barcoavista.blogspot.com/2010/01/submarinos-da-classe-tridente.html> (Acedido em março de 2021)
- Wang, C. (2015). *A study of membership functions on mamdani-type fuzzy inference system for industrial decision-making* (tese de mestrado). Lehigh University.
- Zadeh, L. A. (1965a). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- Zadeh, L. A. (1965b). Fuzzy sets and systems. *Fox, J., ed., Sysem Theory*, 29–37.
- Zadeh, L. A. (1972). A fuzzy-set-theoretic interpretation of linguistic hedges. *Journal of Cybernetics*, 2, 4–34.
- Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy sets. *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A Zadeh* (pp. 394–432). World Scientific.
- Zimmermann, H.-J. (2011). *Fuzzy set theory—and its applications*. Springer Science & Business Media.

Apêndice A - Questionário

Este questionário é uma das ferramentas de recolha de dados utilizada no âmbito da dissertação de mestrado de ciências militares navais do ramo de Marinha, subordinada ao tema: Estudo comparativo dos diferentes sistemas Air Independent Propulsion utilizando lógica difusa, cuja elaboração se foca na identificação dos seguintes objetivos:

- Criar um Sistema de Apoio à Decisão, por forma a encontrar o sistema AIP que mais se adequa aos nossos submarinos e ao atual paradigma da Marinha Portuguesa;
- Atribuir valores de importância a diversas características, com o intuito de modelar a interface do sistema de apoio à decisão (regras);
- Verificar qual dos sistemas AIP obtém um nível de recomendação mais elevado, através dos valores selecionados nos questionários.

NOTA: Os dados fornecidos serão utilizados única e exclusivamente para fins académicos e serão tratados de forma confidencial. Os questionários são anónimos e não contêm quaisquer dados que permitam identificar os respondentes. Apenas com a sua colaboração será possível concretizar com sucesso esta investigação.

Situação: "Imagine-se que a Marinha Portuguesa pretende adquirir um novo sistema AIP para equipar os seus submarinos. Tendo total conhecimento da existência de apenas quatro sistemas (células de combustível, motores de Stirling de ciclo fechado, turbinas a vapor e motores a Diesel de circuito fechado), a Marinha necessita de realizar um estudo, para selecionar qual a melhor tecnologia a adotar, consoante as suas necessidades e as suas possibilidades. Para isso, são identificadas três subcategorias importantes de estudar: a dimensão operacional, que engloba características como a eficiência, potência e assinatura acústica; a dimensão económica, que engloba os custos de aquisição, manutenção e operação; e a dimensão ambiental, que engloba a emissão térmica, subprodutos e tamanho."

| Subcategorias e respetivas características | | |
|--|-----------------------|--------------------|
| Dimensão operacional | Dimensão económica | Dimensão ambiental |
| - Eficiência | - Custo de aquisição | - Emissão térmica |
| - Potência | - Custo de manutenção | - Subprodutos |
| - Assinatura acústica | - Custo de operação | - Tamanho |

FIGURA A.1: Subcategorias e respetivas variáveis

Objetivo: Avaliação qualitativa das dimensões.

Pergunta 1 – Qual a importância que atribui ao papel das seguintes dimensões para a escolha de um sistema?

a) Dimensão operacional (contribuição objetiva para o desempenho operacional dos submarinos, atendendo aos requisitos operacionais definidos pela Marinha).

- ☐ Nada Importante
- ☐ Pouco Importante
- ☐ Importante
- ☐ Muito Importante
- ☐ Extremamente Importante

b) Dimensão económica (relativa aos custos associados ao sistema)

- ☐ Nada Importante
- ☐ Pouco Importante
- ☐ Importante
- ☐ Muito Importante
- ☐ Extremamente Importante

c) Dimensão ambiental (relativa à forma ou medida em que o sistema afeta o meio ambiente em que opera).

- ☐ Nada Importante
- ☐ Pouco Importante
- ☐ Importante
- ☐ Muito Importante
- ☐ Extremamente Importante

Objetivo: Avaliação qualitativa das características.

Pergunta 2 – Qual a relevância que atribui, para a escolha de um sistema, às seguintes características:

a) Eficiência (traduz-se pela razão entre a quantidade de energia/calor que é necessário dar ao sistema e o trabalho que se obtém do mesmo)?

- ☐ Irrelevante
- ☐ Pouco Relevante
- ☐ Relevante
- ☐ Muito Relevante
- ☐ Extremamente Relevante

b) Potência (rapidez com a qual uma certa quantidade de energia é transformada em trabalho)?

- ☐ Irrelevante
- ☐ Pouco Relevante
- ☐ Relevante
- ☐ Muito Relevante
- ☐ Extremamente Relevante

c) Assinatura acústica (registro do nível de ruído provocado pelo equipamento em pleno funcionamento)?

- ☐ Irrelevante
- ☐ Pouco Relevante
- ☐ Relevante
- ☐ Muito Relevante
- ☐ Extremamente Relevante

d) Custo de Aquisição?

- ☐ Irrelevante
- ☐ Pouco Relevante
- ☐ Relevante
- ☐ Muito Relevante
- ☐ Extremamente Relevante

e) Custo de Manutenção?

- ☐ Irrelevante
- ☐ Pouco Relevante
- ☐ Relevante
- ☐ Muito Relevante
- ☐ Extremamente Relevante

f) Custo de Operação?

- ☐ Irrelevante
- ☐ Pouco Relevante
- ☐ Relevante
- ☐ Muito Relevante
- ☐ Extremamente Relevante

g) Emissão térmica (temperatura emitida pelo sistema em funcionamento)?

- ☐ Irrelevante
- ☐ Pouco Relevante
- ☐ Relevante
- ☐ Muito Relevante
- ☐ Extremamente Relevante

h) Tipo de Subprodutos Expelidos (se é poluente ou não)?

___ Irrelevante

___ Pouco Relevante

___ Relevante

___ Muito Relevante

___ Extremamente Relevante

i) Tamanho (espaço/volume ocupado pelo sistema)?

___ Irrelevante

___ Pouco Relevante

___ Relevante

___ Muito Relevante

___ Extremamente Relevante

Outras sugestões/opiniões no desenvolvimento futuro desta dissertação:

Muito obrigado pela sua colaboração!

ASPOF M Reis Sintra

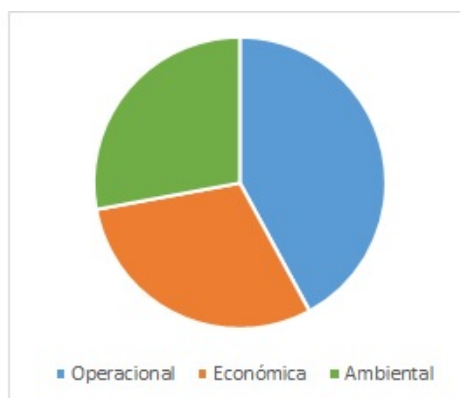
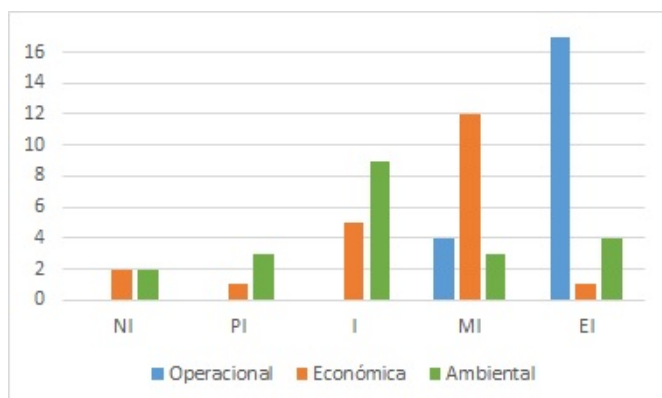
21616

Apêndice B - Tratamento dos dados

Nível de Recomendação

Tabela que apresenta os 21 resultados obtidos no questionário realizado, juntamente com o respetivo gráfico de barras e gráfico circular, onde é possível ter uma melhor visualização das importâncias dadas pelos inquiridos às diferentes subcategorias. Considera-se que NI corresponde a "Nada Importante", PI corresponde a "Pouco Importante", I corresponde a "Importante", MI corresponde a "Muito Importante" e EI corresponde a "Extremamente Importante".

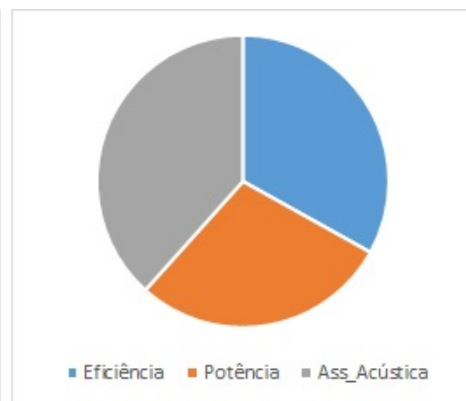
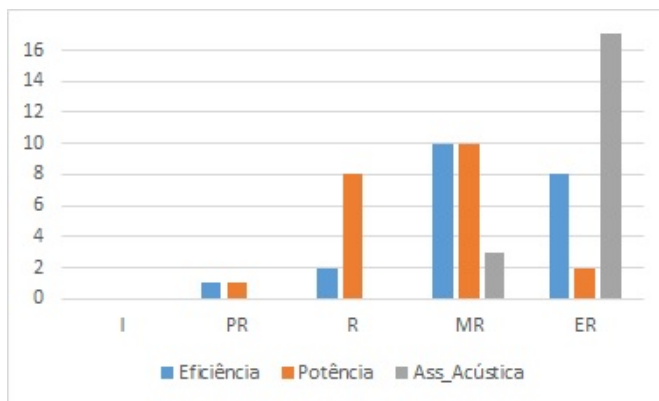
| Dimensão | NI | % | PI | % | I | % | MI | % | EI | % | Total INQ | Média |
|-------------|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|-----------|-------|
| Operacional | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 19 | 17 | 81 | 21 | 4,81 |
| Económica | 2 | 10 | 1 | 5 | 5 | 24 | 12 | 57 | 1 | 5 | 21 | 3,43 |
| Ambiental | 2 | 10 | 3 | 14 | 9 | 43 | 3 | 14 | 4 | 19 | 21 | 3,19 |



Dimensão Operacional

Tabela que apresenta os 21 resultados obtidos no questionário realizado, juntamente com o respetivo gráfico de barras e gráfico circular, onde é possível ter uma melhor visualização das importâncias dadas pelos inquiridos às diferentes características relacionadas com a dimensão operacional. Considera-se que I corresponde a "Irrelevante", PR corresponde a "Pouco Relevante", R corresponde a "Relevante", MR corresponde a "Muito Relevante" e ER corresponde a "Extremamente Relevante".

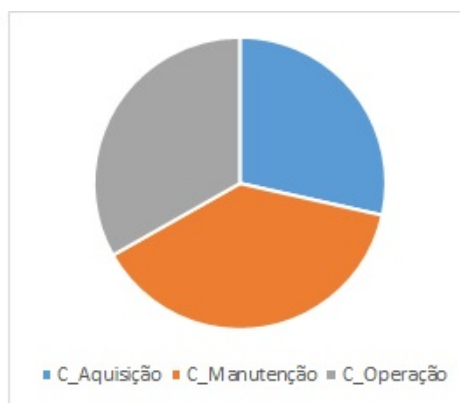
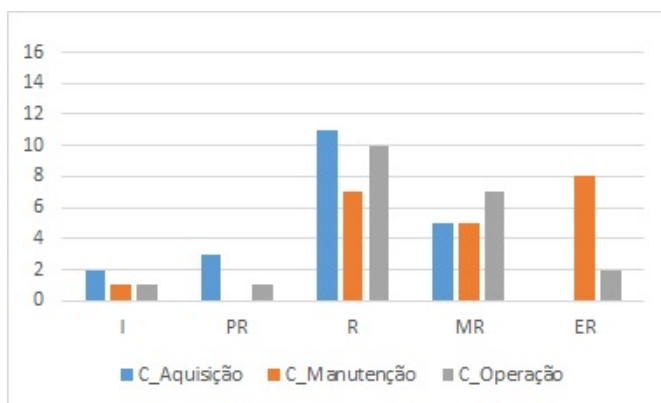
| Dim. Operacional | I | % | PR | % | R | % | MR | % | ER | % | Total INQ | Média |
|---------------------|---|---|----|---|---|----|----|----|----|----|-----------|-------|
| Eficiência | 0 | 0 | 1 | 5 | 2 | 10 | 10 | 48 | 8 | 38 | 21 | 4,19 |
| Potência | 0 | 0 | 1 | 5 | 8 | 38 | 10 | 48 | 2 | 10 | 21 | 3,62 |
| Assinatura acústica | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 14 | 18 | 86 | 21 | 4,86 |



Dimensão Económica

Tabela que apresenta os 21 resultados obtidos no questionário realizado, juntamente com o respetivo gráfico de barras e gráfico circular, onde é possível ter uma melhor visualização das importâncias dadas pelos inquiridos às diferentes características relacionadas com a dimensão económica. Considera-se que I corresponde a "Irrelevante", PR corresponde a "Pouco Relevante", R corresponde a "Relevante", MR corresponde a "Muito Relevante" e ER corresponde a "Extremamente Relevante".

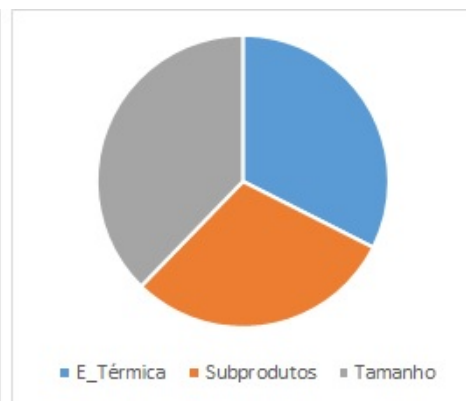
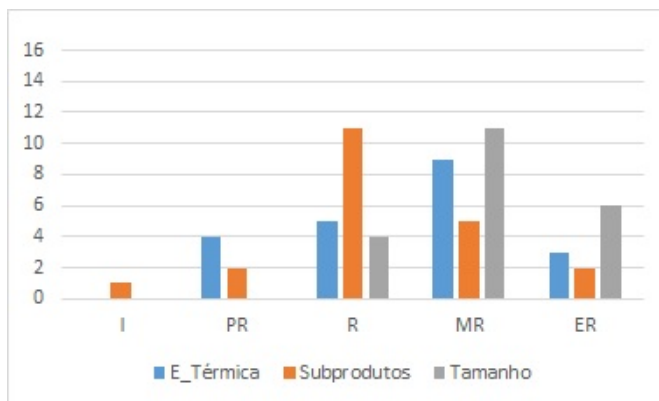
| Dim. Económica | I | % | PR | % | R | % | MR | % | ER | % | Total INQ | Média |
|------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|-------|
| Custo aquisição | 2 | 10 | 3 | 14 | 11 | 52 | 5 | 24 | 0 | 0 | 21 | 2,90 |
| Custo manutenção | 1 | 5 | 0 | 0 | 7 | 33 | 5 | 24 | 8 | 38 | 21 | 3,90 |
| Custo operação | 1 | 5 | 1 | 5 | 10 | 48 | 7 | 33 | 2 | 10 | 21 | 3,38 |



Dimensão Ambiental

Tabela que apresenta os 21 resultados obtidos no questionário realizado, juntamente com o respetivo gráfico de barras e gráfico circular, onde é possível ter uma melhor visualização das importâncias dadas pelos inquiridos às diferentes características relacionadas com a dimensão ambiental. Considera-se que I corresponde a "Irrelevante", PR corresponde a "Pouco Relevante", R corresponde a "Relevante", MR corresponde a "Muito Relevante" e ER corresponde a "Extremamente Relevante".

| Dim. Ambiental | I | % | PR | % | R | % | MR | % | ER | % | Total INQ | Média |
|-----------------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|-------|
| Emissão térmica | 0 | 0 | 4 | 19 | 5 | 24 | 9 | 43 | 3 | 14 | 21 | 3,52 |
| Subprodutos | 1 | 5 | 2 | 10 | 11 | 52 | 5 | 24 | 2 | 10 | 21 | 3,24 |
| Tamanho | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 19 | 11 | 52 | 6 | 29 | 21 | 4,10 |



Anexo I - Base das regras

Dimensão Operacional

Tabela que apresenta a base das regras moldada consoante os resultados obtidos nos questionários para a dimensão operacional, onde para as variáveis eficiência e potência, MM corresponde a "Muito Má", M corresponde a "Má", B corresponde a "Boa" e MB corresponde a "Muito Boa"; no caso da variável assinatura acústica, MB corresponde a "Muito Baixa", B corresponde a "Baixa", A corresponde a "Alta" e MA corresponde a "Muito Alta"; por fim, no caso da subcategoria, B corresponde a "Baixa", M corresponde a "Média" e E corresponde a "Elevado".

| Variáveis de entrada (Antecedentes) | | | Subcategoria (Consequentes) |
|-------------------------------------|----------|---------------------|-----------------------------|
| Eficiência | Potência | Assinatura acústica | Dimensão operacional |
| MM | MM | MB | M |
| | | B | B |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | M | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | B | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | MB | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| M | MM | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | M | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | B | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | MB | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |

| Variáveis de entrada(Antecedentes) | | | Subcategoria(Consequente) |
|------------------------------------|----------|---------------------|---------------------------|
| Eficiência | Potência | Assinatura acústica | Dimensão operacional |
| B | MM | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | M | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | B | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | MB | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| MB | MM | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | M | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | B | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | MB | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | E |
| | | MA | M |

Dimensão Económica

Tabela que apresenta a base das regras moldada consoante os resultados obtidos nos questionários para a dimensão económica, onde para as todas as variáveis pertencentes à subcategoria - dimensão económica, MB corresponde a "Muito Baixo", B corresponde a "Baixo", A corresponde a "Alto" e MA corresponde a "Muito Alto"; por fim, no caso da subcategoria, B corresponde a "Baixa", M corresponde a "Média" e E corresponde a "Elevado".

| Variáveis de entrada(Antecedentes) | | | Subcategoria(Consequente) |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| Custo de aquisição | Custo de manutenção | Custo de operação | Dimensão económica |
| MB | MB | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | E |
| | | MA | M |
| | B | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | A | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | MA | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| B | MB | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | E |
| | | MA | M |
| | B | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | A | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | MA | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |

| Variáveis de entrada(Antecedentes) | | | Subcategoria(Consequente) |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| Custo de aquisição | Custo de manutenção | Custo de operação | Dimensão económica |
| A | MB | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | B | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | A | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | MA | MB | M |
| | | B | B |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| MA | MB | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | B | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | A | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | MA | MB | M |
| | | B | B |
| | | A | B |
| | | MA | B |

Dimensão Ambiental

Tabela que apresenta a base das regras moldada consoante os resultados obtidos nos questionários para a dimensão ambiental, onde para as variáveis emissão térmica e tamanho, MM corresponde a "Muito Má/Mau", M corresponde a "Má/Mau", B corresponde a "Boa/Bom" e MB corresponde a "Muito Boa/Bom"; no caso da variável subproduto, PP corresponde a "Pouco Poluente", P corresponde a "Poluente", MP corresponde a "Muito Poluente" e EP corresponde a "Extremamente Poluente"; por fim, no caso da subcategoria, B corresponde a "Baixa", M corresponde a "Média" e E corresponde a "Elevado".

| Variáveis de entrada(Antecedentes) | | | Subcategoria(Consequente) |
|------------------------------------|------------|---------|---------------------------|
| Emissão térmica | Subproduto | Tamanho | Dimensão ambiental |
| MB | PP | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | E |
| | | MA | M |
| | P | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | MP | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | EP | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| B | PP | MB | E |
| | | B | E |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | P | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | MP | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | EP | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |

| Variáveis de entrada(Antecedentes) | | | Subcategoria(Consequente) |
|------------------------------------|------------|---------|---------------------------|
| Emissão térmica | Subproduto | Tamanho | Dimensão ambiental |
| A | PP | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | M |
| | P | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | MP | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | EP | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| MA | PP | MB | E |
| | | B | M |
| | | A | M |
| | | MA | B |
| | P | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | MP | MB | M |
| | | B | M |
| | | A | B |
| | | MA | B |
| | EP | MB | M |
| | | B | B |
| | | A | B |
| | | MA | B |

Nível de Recomendação

Tabela que apresenta a base das regras moldada consoante os resultados obtidos nos questionários para o nível de recomendação, onde para ambas as subcategorias, como referido nas outras tabelas apresentadas anteriormente, que B corresponde a "Baixa", M corresponde a "Média" e E corresponde a "Elevada"; por fim, no caso do nível de recomendação, MB corresponde a "Muito Baixo", B corresponde a "Baixo", M corresponde a "Médio", E corresponde a "Elevado" e ME corresponde a "Muito Elevado".

| Subcategorias(Antecedentes) | | | Variável de saída(consequentes) |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Dimensão operacional | Dimensão económica | Dimensão ambiental | Nível de recomendação |
| B | B | B | MB |
| | | M | MB |
| | | E | B |
| | M | B | MB |
| | | M | B |
| | | E | M |
| | E | B | B |
| | | M | M |
| | | E | M |
| M | B | B | B |
| | | M | B |
| | | E | M |
| | M | B | B |
| | | M | M |
| | | E | E |
| | E | B | M |
| | | M | E |
| | | E | E |
| E | B | B | M |
| | | M | M |
| | | E | E |
| | M | B | M |
| | | M | E |
| | | E | ME |
| | E | B | E |
| | | M | ME |
| | | E | ME |

Anexo II - Regras Ativadas

Regras ativadas para cada sistema, após implementados os valores de entrada de cada uma das características avaliadas.

Para a dimensão operacional considere-se que a eficiência é dada por "ef", a potência por "pot" e assinatura acústica por "a.ac"; para a dimensão económica considere-se que custo de aquisição é dado por "c.a", custo de manutenção por "c.m" e custo de operação por "c.o"; para a dimensão ambiental considere-se que emissão térmica é dada por "e.t", o subproduto por "s" e o tamanho por "t"; por fim, para o nível de recomendação considere-se que a dimensão operacional é dada por "d.o", a dimensão económica por "d.e" e a dimensão ambiental por "d.a".

II.1 Células de combustível

Dimensão Operacional

- "SE eficiência B, potência M e assinatura acústica MB, ENTÃO dimensão operacional E", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(ef) \cap \mu_M(pot) \cap \mu_{MB}(a.ac) = \min(\mu_B(ef), \mu_M(pot), \mu_{MB}(a.ac)) = 1$$

- "SE eficiência B, potência M e assinatura acústica B, ENTÃO dimensão operacional M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(ef) \cap \mu_M(pot) \cap \mu_B(a.ac) = \min(\mu_B(ef), \mu_M(pot), \mu_B(a.ac)) = 0,1$$

Dimensão Económica

- "SE custo de aquisição A, custo de manutenção B e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(c.a) \cap \mu_B(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_A(c.a), \mu_B(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,6$$

- "SE custo de aquisição A, custo de manutenção A e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(c.a) \cap \mu_A(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_A(c.a), \mu_A(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,4$$

- "SE custo de aquisição MA, custo de manutenção A e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MA}(c.a) \cap \mu_A(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_{MA}(c.a), \mu_A(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,4$$

- "SE custo de aquisição MA, custo de manutenção B e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MA}(c.a) \cap \mu_B(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_{MA}(c.a), \mu_B(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,4$$

Dimensão Ambiental

- "SE emissão térmica MB, subproduto PP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental E", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MB}(e.t) \cap \mu_{PP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_{MB}(e.t), \mu_{PP}(s), \mu_A(t)) = 1$$

- "SE emissão térmica MB, subproduto P e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MB}(e.t) \cap \mu_P(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_{MB}(e.t), \mu_P(s), \mu_A(t)) = 0,1$$

- "SE emissão térmica B, subproduto P e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(e.t) \cap \mu_P(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_B(e.t), \mu_P(s), \mu_A(t)) = 0,1$$

- "SE emissão térmica B, subproduto PP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental E", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(e.t) \cap \mu_{PP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_B(e.t), \mu_{PP}(s), \mu_A(t)) = 0,1$$

Nível de Recomendação

- "SE dimensão operacional E, dimensão económica M e dimensão ambiental E, ENTÃO nível de recomendação ME", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_E(d.o) \cap \mu_M(d.e) \cap \mu_E(d.a) = \min(\mu_E(d.o), \mu_M(d.e), \mu_E(d.a)) = 0,8$$

- "SE dimensão operacional M, dimensão económica M e dimensão ambiental E, ENTÃO nível de recomendação E", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(d.o) \cap \mu_M(d.e) \cap \mu_E(d.a) = \min(\mu_M(d.o), \mu_M(d.e), \mu_E(d.a)) = 0, 1$$

- "SE dimensão operacional E, dimensão económica M e dimensão ambiental M, ENTÃO nível de recomendação E", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_E(d.o) \cap \mu_M(d.e) \cap \mu_M(d.a) = \min(\mu_E(d.o), \mu_M(d.e), \mu_M(d.a)) = 0, 1$$

- "SE dimensão operacional M, dimensão económica M e dimensão ambiental M, ENTÃO nível de recomendação M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(d.o) \cap \mu_M(d.e) \cap \mu_M(d.a) = \min(\mu_M(d.o), \mu_M(d.e), \mu_M(d.a)) = 0, 1$$

II.2 Motores de Stirling

Dimensão Operacional

- "SE eficiência M, potência M e assinatura acústica B, ENTÃO dimensão operacional E", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_M(pot) \cap \mu_B(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_M(pot), \mu_B(a.ac)) = 0,7$$

- "SE eficiência M, potência MM e assinatura acústica B, ENTÃO dimensão operacional E", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_{MM}(pot) \cap \mu_B(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_{MM}(pot), \mu_B(a.ac)) = 0,3$$

Dimensão Económica

- "SE custo de aquisição B, custo de manutenção A e custo de operação B, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(c.a) \cap \mu_A(c.m) \cap \mu_B(c.o) = \min(\mu_B(c.a), \mu_A(c.m), \mu_B(c.o)) = 0,6$$

- "SE custo de aquisição A, custo de manutenção A e custo de operação B, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(c.a) \cap \mu_A(c.m) \cap \mu_B(c.o) = \min(\mu_A(c.a), \mu_A(c.m), \mu_B(c.o)) = 0,4$$

- "SE custo de aquisição A, custo de manutenção B e custo de operação B, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(c.a) \cap \mu_B(c.m) \cap \mu_B(c.o) = \min(\mu_A(c.a), \mu_B(c.m), \mu_B(c.o)) = 0,1$$

- "SE custo de aquisição B, custo de manutenção B e custo de operação B, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(c.a) \cap \mu_B(c.m) \cap \mu_B(c.o) = \min(\mu_B(c.a), \mu_B(c.m), \mu_B(c.o)) = 0,1$$

Dimensão Ambiental

- "SE emissão térmica A, subproduto MP e tamanho B, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(e.t) \cap \mu_{MP}(s) \cap \mu_B(t) = \min(\mu_A(e.t), \mu_{MP}(s), \mu_B(t)) = 0,6$$

- "SE emissão térmica B, subproduto MP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(e.t) \cap \mu_{MP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_B(e.t), \mu_{MP}(s), \mu_A(t)) = 0,2$$

- "SE emissão térmica B, subproduto EP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(e.t) \cap \mu_{EP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_B(e.t), \mu_{EP}(s), \mu_A(t)) = 0,2$$

- "SE emissão térmica A, subproduto EP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(e.t) \cap \mu_{EP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_A(e.t), \mu_{EP}(s), \mu_A(t)) = 0,4$$

Nível de Recomendação

- "SE dimensão operacional M, dimensão económica M e dimensão ambiental M, ENTÃO nível de recomendação M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(d.o) \cap \mu_M(d.e) \cap \mu_M(d.a) = \min(\mu_M(d.o), \mu_M(d.e), \mu_M(d.a)) = 1$$

II.3 Turbinas a Vapor

Dimensão Operacional

- "SE eficiência M, potência B e assinatura acústica A, ENTÃO dimensão operacional M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_B(pot) \cap \mu_A(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_B(pot), \mu_A(a.ac)) = 0,6$$

- "SE eficiência M, potência MB e assinatura acústica A, ENTÃO dimensão operacional M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_{MB}(pot) \cap \mu_A(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_{MB}(pot), \mu_A(a.ac)) = 0,4$$

- "SE eficiência MM, potência MB e assinatura acústica A, ENTÃO dimensão operacional M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MM}(ef) \cap \mu_{MB}(pot) \cap \mu_A(a.ac) = \min(\mu_{MM}(ef), \mu_{MB}(pot), \mu_A(a.ac)) = 0,1$$

- "SE eficiência MM, potência B e assinatura acústica A, ENTÃO dimensão operacional B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MM}(ef) \cap \mu_B(pot) \cap \mu_A(a.ac) = \min(\mu_{MM}(ef), \mu_B(pot), \mu_A(a.ac)) = 0,1$$

Dimensão Económica

- "SE custo de aquisição A, custo de manutenção A e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(c.a) \cap \mu_A(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_A(c.a), \mu_A(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,6$$

- "SE custo de aquisição A, custo de manutenção MA e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(c.a) \cap \mu_{MA}(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_A(c.a), \mu_{MA}(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,4$$

- "SE custo de aquisição MA, custo de manutenção A e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MA}(c.a) \cap \mu_A(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_{MA}(c.a), \mu_A(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,4$$

- "SE custo de aquisição MA, custo de manutenção MA e custo de operação A, ENTÃO dimensão económica B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MA}(c.a) \cap \mu_{MA}(c.m) \cap \mu_A(c.o) = \min(\mu_{MA}(c.a), \mu_{MA}(c.m), \mu_A(c.o)) = 0,4$$

Dimensão Ambiental

- "SE emissão térmica A, subproduto MP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(e.t) \cap \mu_{MP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_A(e.t), \mu_{MP}(s), \mu_A(t)) = 0,6$$

- "SE emissão térmica A, subproduto EP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(e.t) \cap \mu_{EP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_A(e.t), \mu_{EP}(s), \mu_A(t)) = 0,4$$

- "SE emissão térmica MA, subproduto EP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MA}(e.t) \cap \mu_{EP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_{MA}(e.t), \mu_{EP}(s), \mu_A(t)) = 0,4$$

- "SE emissão térmica MA, subproduto MP e tamanho A, ENTÃO dimensão ambiental B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_{MA}(e.t) \cap \mu_{MP}(s) \cap \mu_A(t) = \min(\mu_{MA}(e.t), \mu_{MP}(s), \mu_A(t)) = 0,4$$

Nível de Recomendação

- "SE dimensão operacional M, dimensão económica M e dimensão ambiental B, ENTÃO nível de recomendação B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(d.o) \cap \mu_M(d.e) \cap \mu_B(d.a) = \min(\mu_M(d.o), \mu_M(d.e), \mu_B(d.a)) = 1$$

II.4 Motores a Diesel

Dimensão Operacional

- "SE eficiência M, potência B e assinatura acústica MA, ENTÃO dimensão operacional B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_B(pot) \cap \mu_{MA}(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_B(pot), \mu_{MA}(a.ac)) = 1$$

- "SE eficiência M, potência B e assinatura acústica A, ENTÃO dimensão operacional M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_B(pot) \cap \mu_A(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_B(pot), \mu_A(a.ac)) = 0,2$$

- "SE eficiência M, potência M e assinatura acústica A, ENTÃO dimensão operacional M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_M(pot) \cap \mu_A(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_M(pot), \mu_A(a.ac)) = 0,1$$

- "SE eficiência M, potência M e assinatura acústica MA, ENTÃO dimensão operacional B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_M(ef) \cap \mu_M(pot) \cap \mu_{MA}(a.ac) = \min(\mu_M(ef), \mu_M(pot), \mu_{MA}(a.ac)) = 0,1$$

Dimensão Económica

- "SE custo de aquisição B, custo de manutenção B e custo de operação B, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(c.a) \cap \mu_B(c.m) \cap \mu_B(c.o) = \min(\mu_B(c.a), \mu_B(c.m), \mu_B(c.o)) = 0,6$$

- "SE custo de aquisição B, custo de manutenção A e custo de operação B, ENTÃO dimensão económica M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(c.a) \cap \mu_A(c.m) \cap \mu_B(c.o) = \min(\mu_B(c.a), \mu_A(c.m), \mu_B(c.o)) = 0,4$$

Dimensão Ambiental

- "SE emissão térmica A, subproduto MP e tamanho B, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(e.t) \cap \mu_{MP}(s) \cap \mu_B(t) = \min(\mu_A(e.t), \mu_{MP}(s), \mu_B(t)) = 0,6$$

- "SE emissão térmica A, subproduto EP e tamanho B, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_A(e.t) \cap \mu_{EP}(s) \cap \mu_B(t) = \min(\mu_A(e.t), \mu_{EP}(s), \mu_B(t)) = 0,4$$

- "SE emissão térmica B, subproduto EP e tamanho B, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(e.t) \cap \mu_{EP}(s) \cap \mu_B(t) = \min(\mu_B(e.t), \mu_{EP}(s), \mu_B(t)) = 0,2$$

- "SE emissão térmica B, subproduto MP e tamanho B, ENTÃO dimensão ambiental M", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

$$\mu_B(e.t) \cap \mu_{MP}(s) \cap \mu_B(t) = \min(\mu_B(e.t), \mu_{MP}(s), \mu_B(t)) = 0,2$$

Nível de Recomendação

- "SE dimensão operacional B, dimensão económica M e dimensão ambiental M, ENTÃO nível de recomendação B", pelo que a interseção destes 3 conjuntos é dada por:

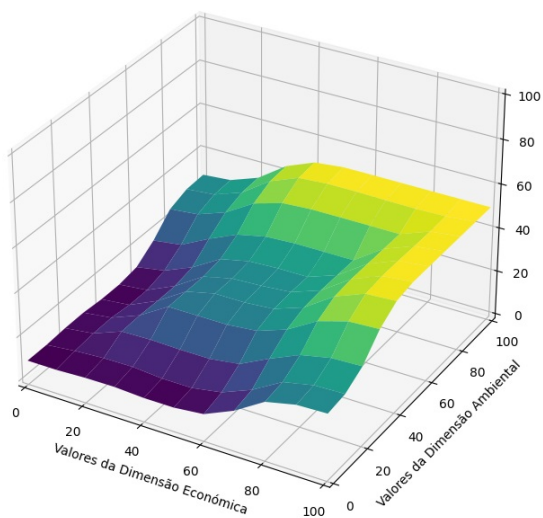
$$\mu_B(d.o) \cap \mu_M(d.e) \cap \mu_M(d.a) = \min(\mu_B(d.o), \mu_M(d.e), \mu_M(d.a)) = 1$$

Anexo III - Validação dos dados

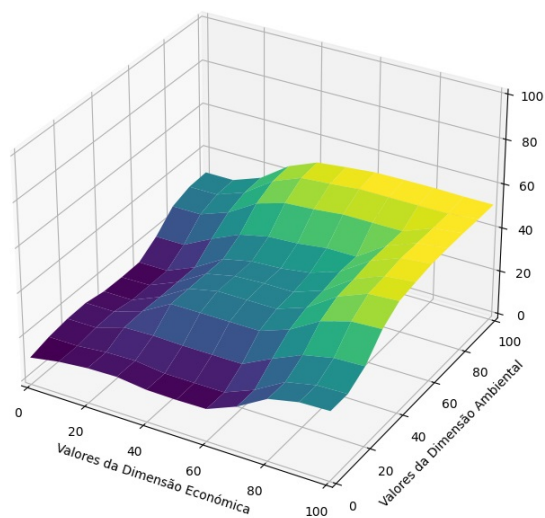
III.1 Dimensão operacional fixa

Gráficos referentes à validação dos dados, onde é possível verificar que, neste caso, existe uma demonstração de crescimento dos valores da recomendação com o aumento da dimensão económica e com o aumento da dimensão ambiental para cada valor fixo da dimensão operacional (valores de 0 e 100).

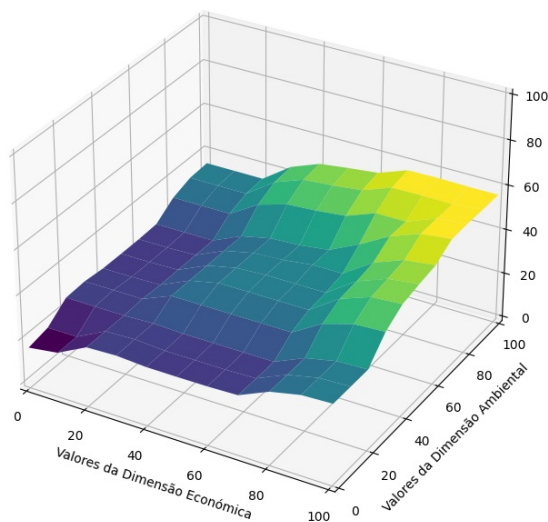
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 0



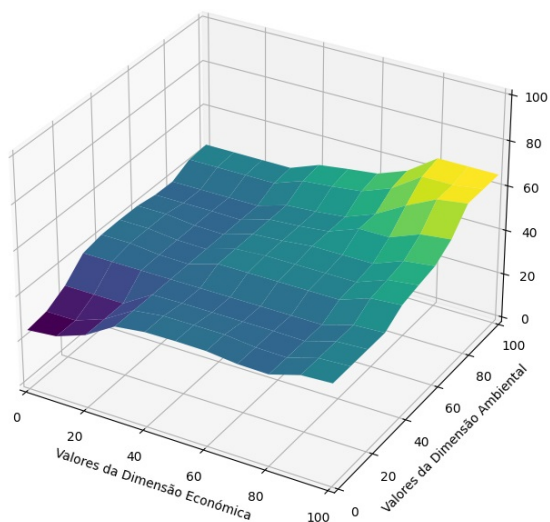
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 10



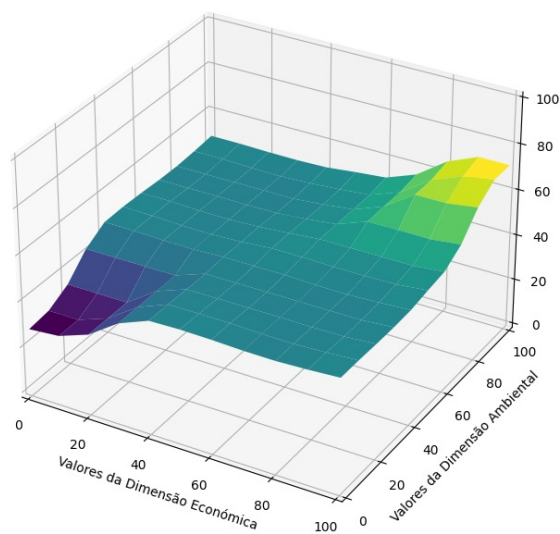
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 20



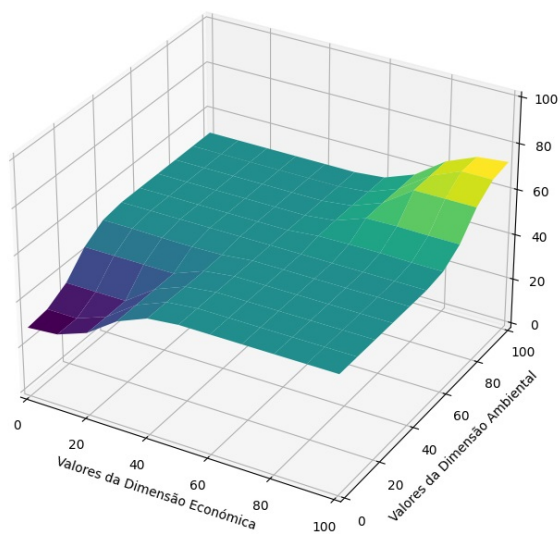
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 30



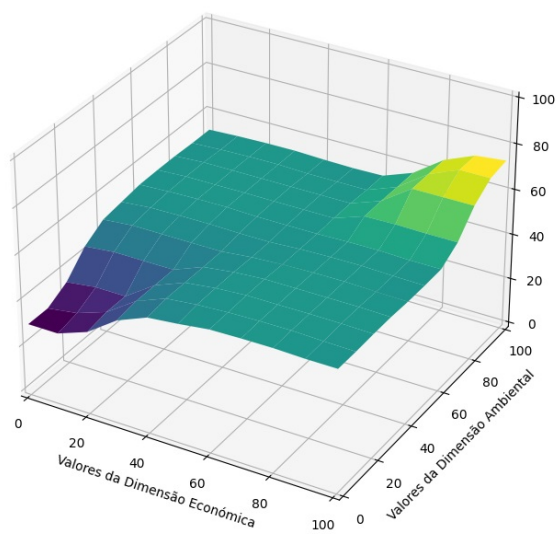
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 40



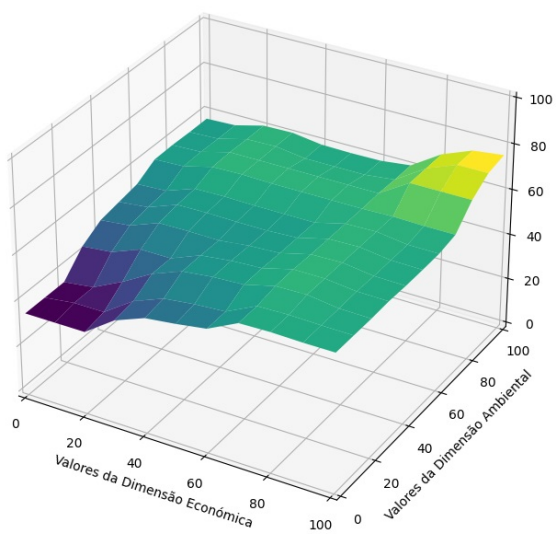
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 50



Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 60

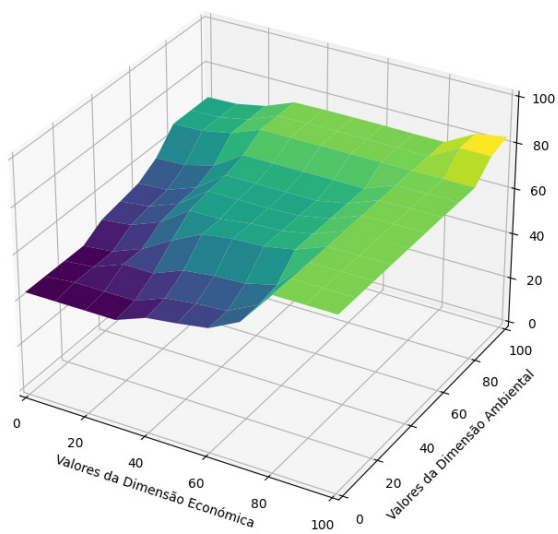


Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 70

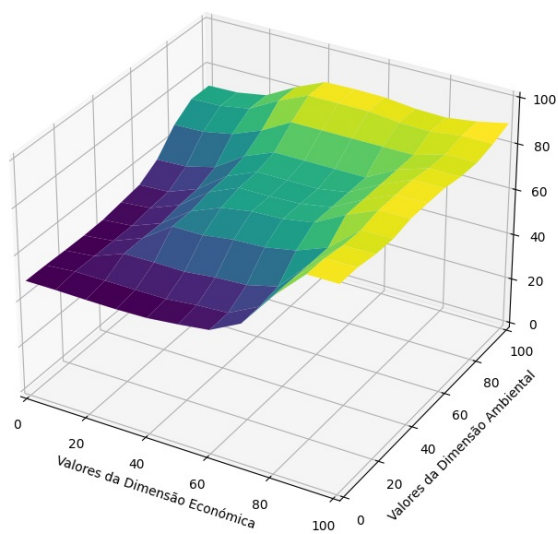


III.1. Dimensão operacional fixa

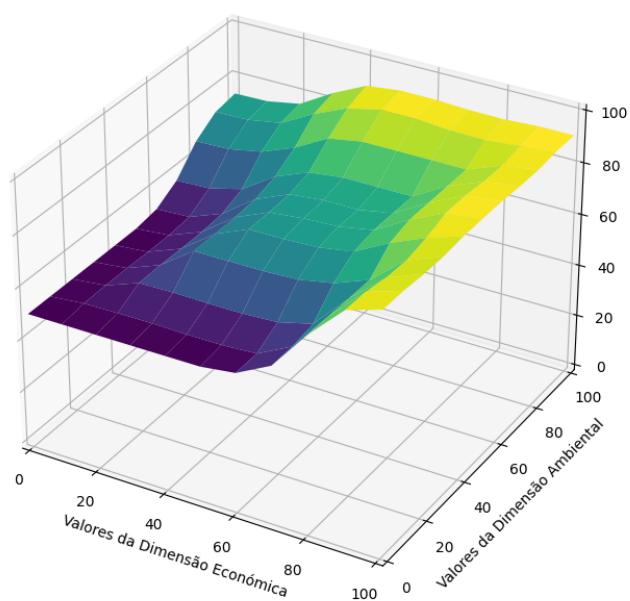
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 80



Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 90



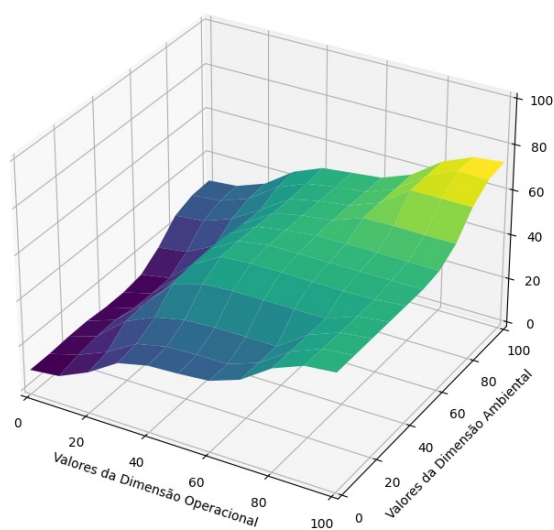
Valores de recomendação para Dimensão Operacional = 100



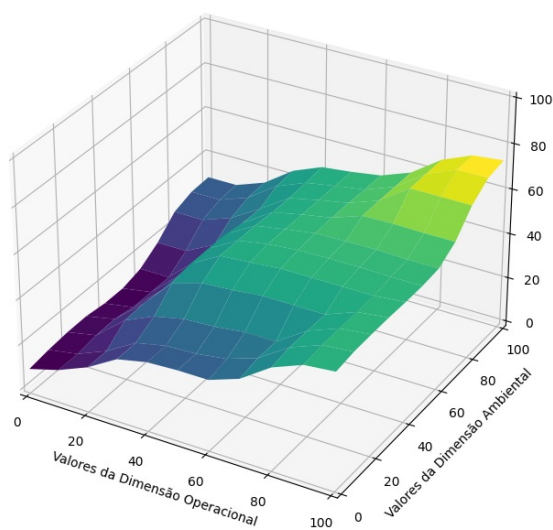
III.2 Dimensão económica fixa

Gráficos referentes à validação dos dados, onde é possível verificar que, neste caso, existe uma demonstração de crescimento dos valores da recomendação com o aumento da dimensão operacional e com o aumento da dimensão ambiental para cada valor fixo da dimensão económica (valores de 0 e 100).

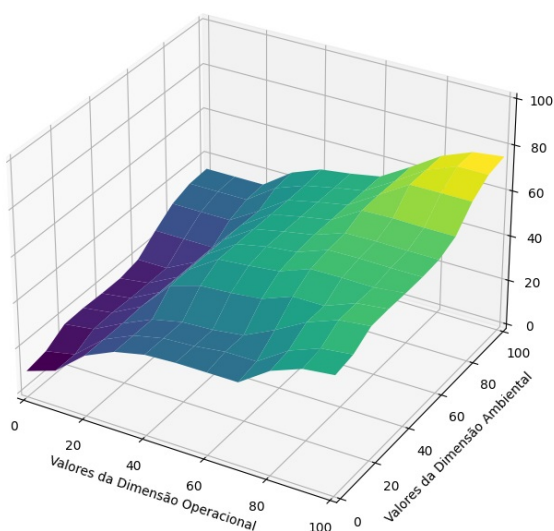
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 0



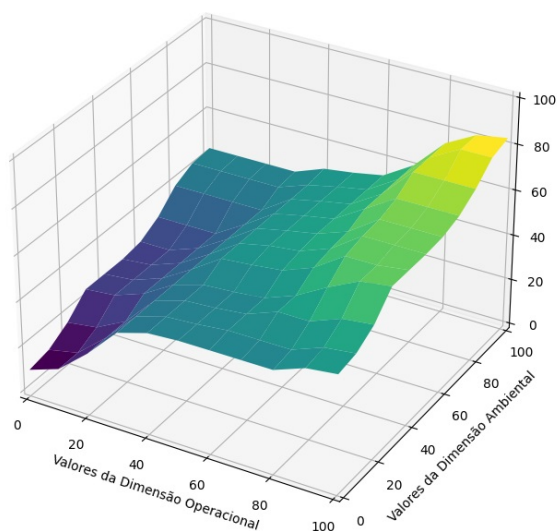
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 10



Valores de recomendação para Dimensão Económica = 20

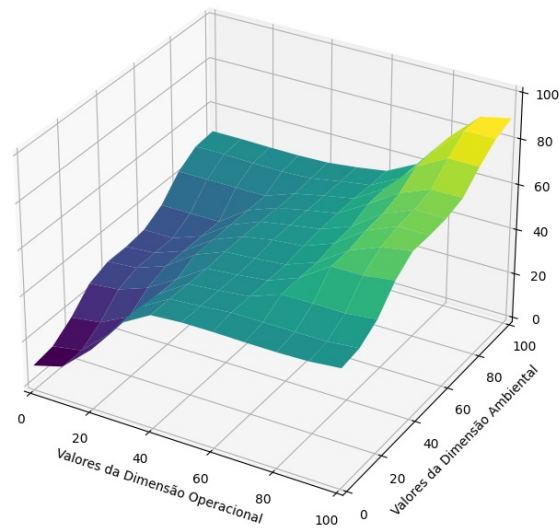


Valores de recomendação para Dimensão Económica = 30

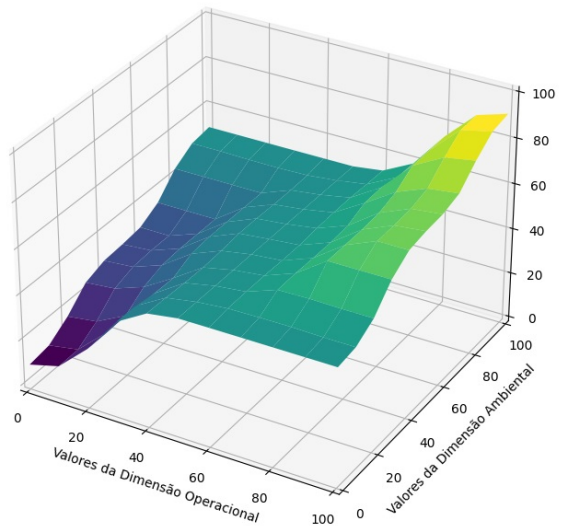


III.2. Dimensão económica fixa

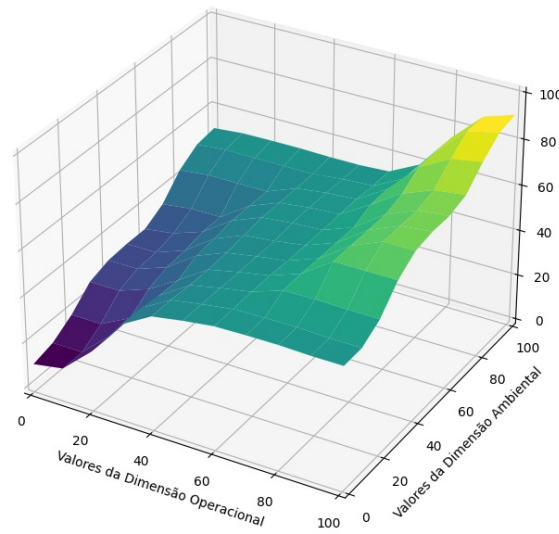
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 40



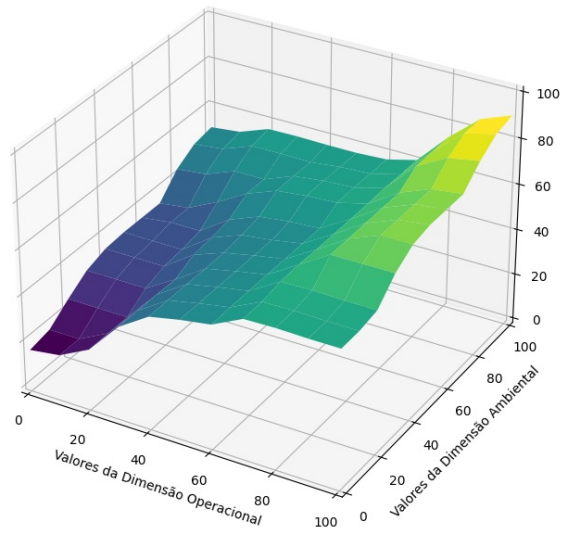
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 50



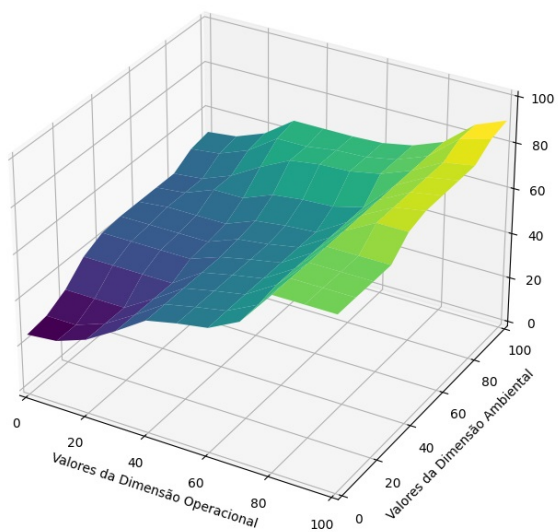
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 60



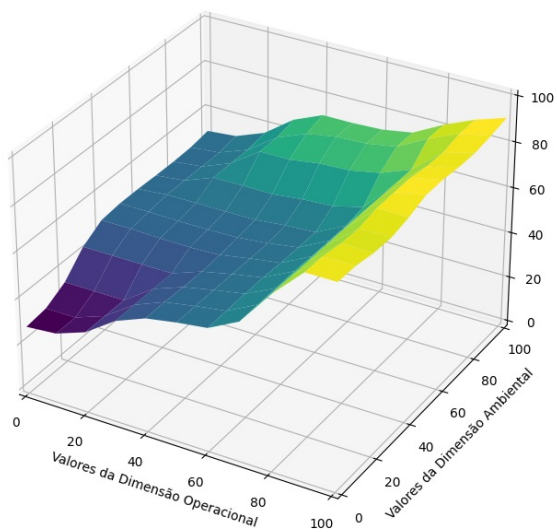
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 70



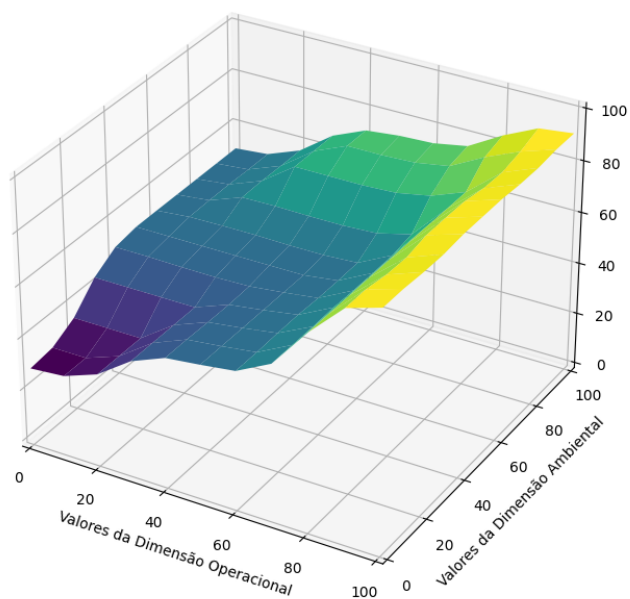
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 80



Valores de recomendação para Dimensão Económica = 90



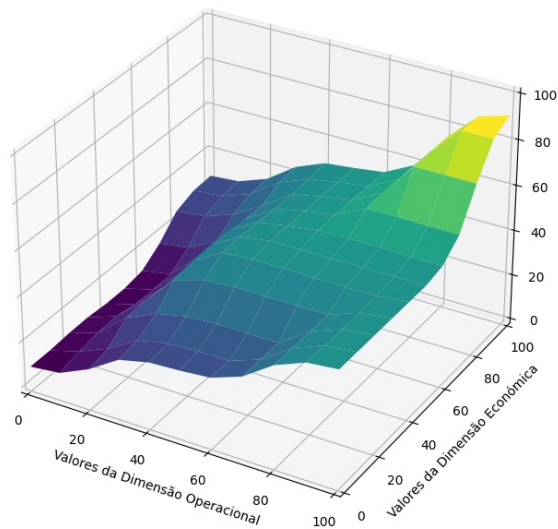
Valores de recomendação para Dimensão Económica = 100



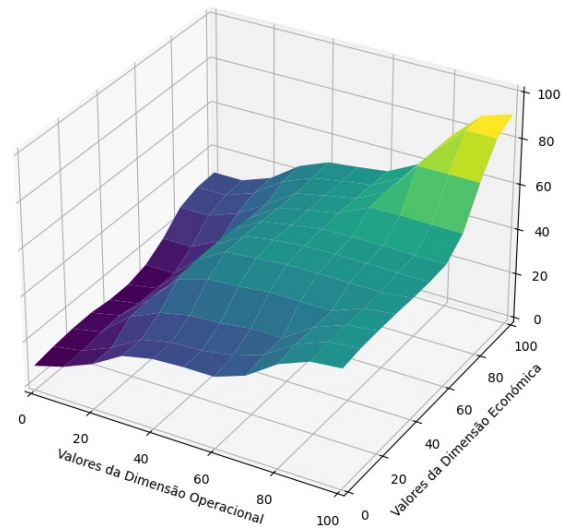
III.3 Dimensão ambiental fixa

Gráficos referentes à validação dos dados, onde é possível verificar que, neste caso, existe uma demonstração de crescimento dos valores da recomendação com o aumento da dimensão operacional e com o aumento da dimensão económica para cada valor fixo da dimensão ambiental (valores de 0 e 100).

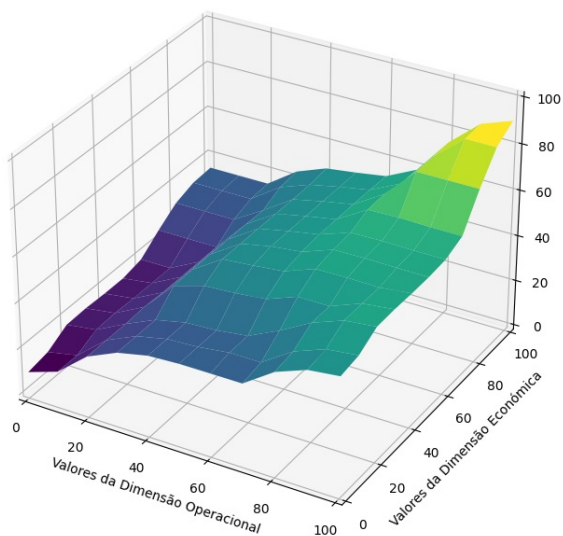
Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 0



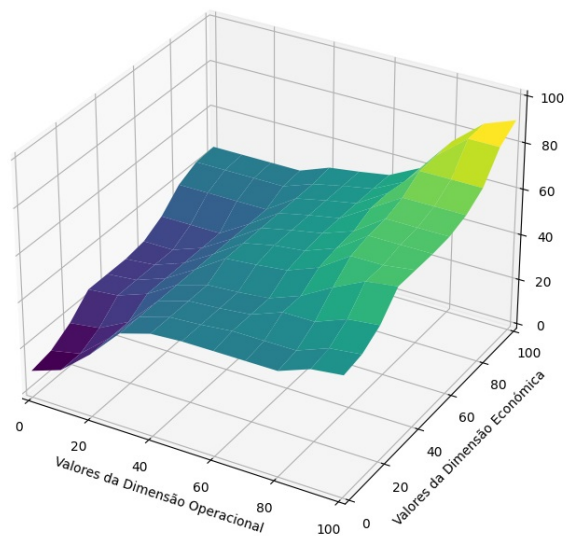
Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 10



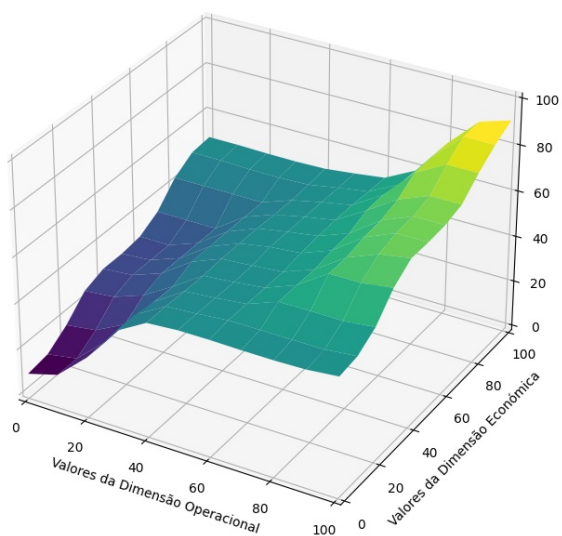
Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 20



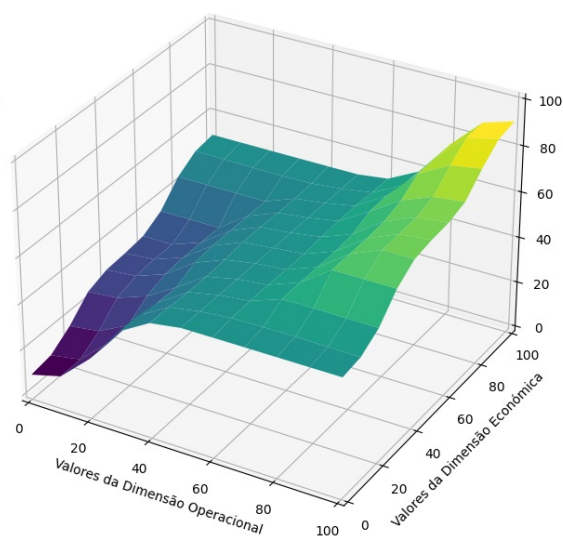
Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 30



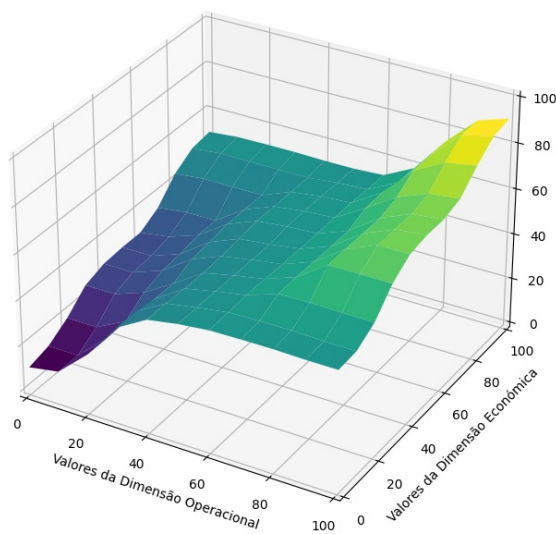
Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 40



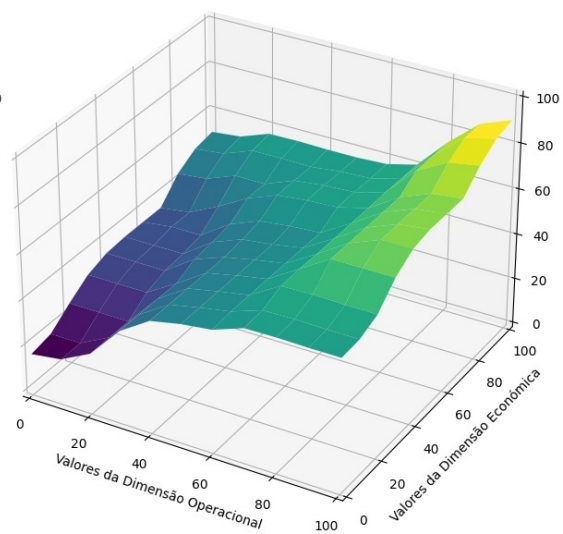
Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 50



Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 60

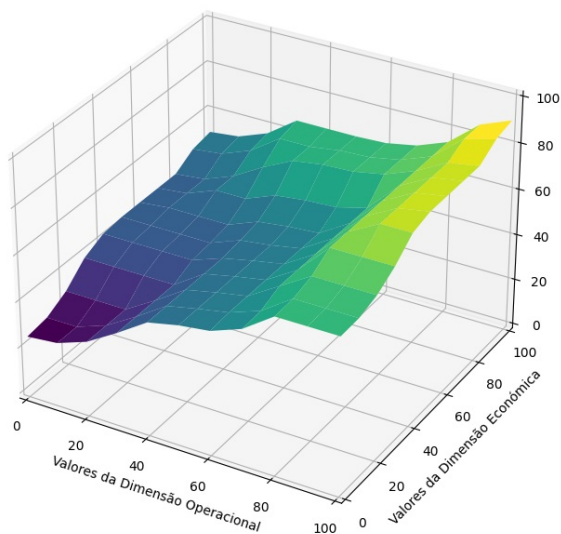


Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 70

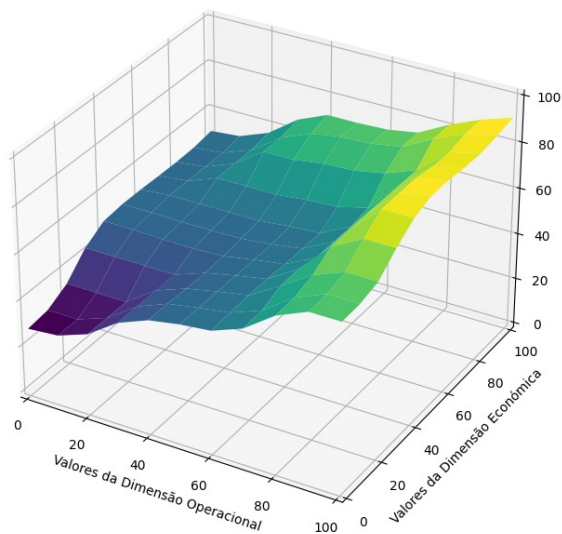


III.3. Dimensão ambiental fixa

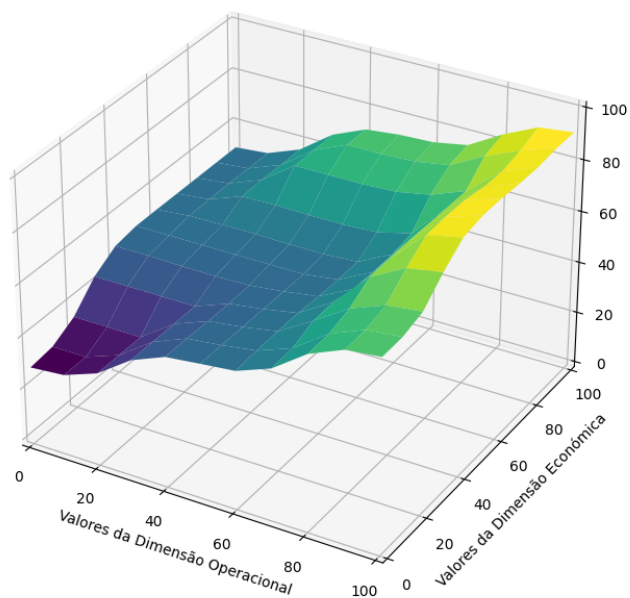
Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 80



Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 90



Valores de recomendação para Dimensão Ambiental = 100



Anexo IV - Código do programa

Definição dos antecedentes e consequentes - 1ª fase

```
1
2 import numpy as np
3 import skfuzzy as fuzz
4 from skfuzzy import control as ctrl
5
6 #Características de entrada – variável eficiencia
7 eficiencia=ctrl.Antecedent(np.arange(0,101,1), 'Eficiência')
8
9 eficiencia['Muito Má']= fuzz.gauss2mf(eficiencia.universe,0,8,8,8)
10 eficiencia['Má']= fuzz.gauss2mf(eficiencia.universe,27,8,42,8)
11 eficiencia['Boa']= fuzz.gauss2mf(eficiencia.universe,60,7,73,7)
12 eficiencia['Muito Boa']= fuzz.gauss2mf(eficiencia.universe,90,7,100,7)
13
14 # Para visualizar grafico referente a eficiencia
15 eficiencia.view()
16
17 #Características de entrada – variavel potencia
18 potencia=ctrl.Antecedent(np.arange(0,10,0.1), 'Potência')
19
20 potencia['Muito Má']= fuzz.gauss2mf(potencia.universe,0,0.8,0.8,0.8)
21 potencia['Má']= fuzz.gauss2mf(potencia.universe,2.7,0.8,4.2,0.8)
22 potencia['Boa']= fuzz.gauss2mf(potencia.universe,6.0,0.7,7.3,0.7)
23 potencia['Muito Boa']= fuzz.gauss2mf(potencia.universe,9.0,0.7,10,0.7)
24
25 # Para visualizar grafico referente a potencia
26 potencia.view()
27
28 #Características de entrada – variavel assinatura acustica
29 ass_acustica=ctrl.Antecedent(np.arange(0,10,0.1), 'Assinatura Acústica')
30
31 ass_acustica['Muito Baixa']= fuzz.gauss2mf(ass_acustica.universe
32     ,0,0.8,0.8,0.8)
32 ass_acustica['Baixa']= fuzz.gauss2mf(ass_acustica.universe
33     ,2.7,0.8,4.2,0.8)
33 ass_acustica['Alta']= fuzz.gauss2mf(ass_acustica.universe
34     ,6.0,0.7,7.3,0.7)
34 ass_acustica['Muito Alta']= fuzz.gauss2mf(ass_acustica.universe
35     ,9.0,0.7,10,0.7)
35
36 # Para visualizar grafico referente a assinatura acustica
```

```

37 ass_acustica.view()
38
39 #Características de entrada – variavel custo de aquisição
40 c_aquisicao=ctrl.Antecedent(np.arange(0,10,0.1),'Custo de Aquisição')
41
42 c_aquisicao['Muito Baixo']= fuzz.gauss2mf(c_aquisicao.universe
    ,0,0.8,0.8,0.8)
43 c_aquisicao['Baixo']= fuzz.gauss2mf(c_aquisicao.universe
    ,2.7,0.8,4.2,0.8)
44 c_aquisicao['Alto']= fuzz.gauss2mf(c_aquisicao.universe
    ,6.0,0.7,7.3,0.7)
45 c_aquisicao['Muito Alto']= fuzz.gauss2mf(c_aquisicao.universe
    ,9.0,0.7,10,0.7)
46
47 # Para visualizar grafico referente a custo de aquisição
48 c_aquisicao.view()
49
50 #Características de entrada – variavel custo de manutenção
51 c_manutencao=ctrl.Antecedent(np.arange(0,10,0.1),'Custo de Manutenção')
52
53 c_manutencao['Muito Baixo']= fuzz.gauss2mf(c_manutencao.universe
    ,0,0.8,0.8,0.8)
54 c_manutencao['Baixo']= fuzz.gauss2mf(c_manutencao.universe
    ,2.7,0.8,4.2,0.8)
55 c_manutencao['Alto']= fuzz.gauss2mf(c_manutencao.universe
    ,6.0,0.7,7.3,0.7)
56 c_manutencao['Muito Alto']= fuzz.gauss2mf(c_manutencao.universe
    ,9.0,0.7,10,0.7)
57
58 # Para visualizar grafico referente a custo de manutenção
59 c_manutencao.view()
60
61 #Características de entrada – variavel custo de operação
62 c_operacao=ctrl.Antecedent(np.arange(0,10,0.1),'Custo de Operação')
63
64 c_operacao['Muito Baixo']= fuzz.gauss2mf(c_operacao.universe
    ,0,0.8,0.8,0.8)
65 c_operacao['Baixo']= fuzz.gauss2mf(c_operacao.universe,2.7,0.8,4.2,0.8)
66 c_operacao['Alto']= fuzz.gauss2mf(c_operacao.universe,6.0,0.7,7.3,0.7)
67 c_operacao['Muito Alto']= fuzz.gauss2mf(c_operacao.universe
    ,9.0,0.7,10,0.7)
68
69 # Para visualizar grafico referente a custo de operação
70 c_operacao.view()
71

```

```

72 #Características de entrada – variavel emissão termica
73 em_termica=ctrl.Antecedent(np.arange(0,900,1), 'Emissão Térmica')
74
75 em_termica['Muito Baixa']= fuzz.gauss2mf(em_termica.universe
    ,0,80,60,80)
76 em_termica['Baixa']= fuzz.gauss2mf(em_termica.universe,250,80,350,80)
77 em_termica['Alta']= fuzz.gauss2mf(em_termica.universe,530,70,630,70)
78 em_termica['Muito Alta']= fuzz.gauss2mf(em_termica.universe
    ,800,70,900,70)
79
80 # Para visualizar grafico referente a emissão termica
81 em_termica.view()
82
83 #Características de entrada – variavel subproduto
84 subproduto=ctrl.Antecedent(np.arange(0,10,0.1), 'Subproduto')
85
86 subproduto['Pouco Poluente']= fuzz.gauss2mf(subproduto.universe
    ,0,0.8,0.8,0.8)
87 subproduto['Poluente']= fuzz.gauss2mf(subproduto.universe
    ,2.7,0.8,4.2,0.8)
88 subproduto['Muito Poluente']= fuzz.gauss2mf(subproduto.universe
    ,6.0,0.7,7.3,0.7)
89 subproduto['Extremamente Poluente']= fuzz.gauss2mf(subproduto.universe
    ,9.0,0.7,10,0.7)
90
91 # Para visualizar grafico referente ao subproduto
92 subproduto.view()
93
94 #Características de entrada – variavel tamanho
95 tamanho=ctrl.Antecedent(np.arange(0,10,0.1), 'Tamanho')
96
97 tamanho['Muito Baixo']= fuzz.gauss2mf(tamanho.universe,0,0.8,0.8,0.8)
98 tamanho['Baixo']= fuzz.gauss2mf(tamanho.universe,2.7,0.8,4.2,0.8)
99 tamanho['Alto']= fuzz.gauss2mf(tamanho.universe,6.0,0.7,7.3,0.7)
100 tamanho['Muito Alto']= fuzz.gauss2mf(tamanho.universe,9.0,0.7,10,0.7)
101
102 # Para visualizar gráfico referente ao tamanho
103 tamanho.view()
104
105 #Criação das subcategorias para consequencia
106 #Subcategoria – Dimensão operacional
107 dim_operacional=ctrl.Consequent(np.arange(0,101,1), 'Dimensão
    Operacional')
108

```

```

109 dim_operacional[ 'Baixa' ]= fuzz.gauss2mf(dim_operacional.universe
    ,0,10,15,10)
110 dim_operacional[ 'Média' ]= fuzz.gauss2mf(dim_operacional.universe
    ,38,8,62,8)
111 dim_operacional[ 'Elevada' ]= fuzz.gauss2mf(dim_operacional.universe
    ,85,10,100,10)
112
113 # Para visualizar grafico referente a dimensao operacional
114 dim_operacional.view()
115
116 #Subcategoria – Dimensão economica
117 dim_economica=ctrl.Consequent(np.arange(0,101,1) , 'Dimensão Económica')
118
119 dim_economica[ 'Baixa' ]= fuzz.gauss2mf(dim_economica.universe
    ,0,10,15,10)
120 dim_economica[ 'Média' ]= fuzz.gauss2mf(dim_economica.universe,38,8,62,8)
121 dim_economica[ 'Elevada' ]= fuzz.gauss2mf(dim_economica.universe
    ,85,10,100,10)
122
123 # Para visualizar grafico referente a dimensao economica
124 dim_economica.view()
125
126 #Subcategoria – Dimensao ambiental
127 dim_ambiental=ctrl.Consequent(np.arange(0,101,1) , 'Dimensão Ambiental')
128
129 dim_ambiental[ 'Baixa' ]= fuzz.gauss2mf(dim_ambiental.universe
    ,0,10,15,10)
130 dim_ambiental[ 'Média' ]= fuzz.gauss2mf(dim_ambiental.universe,38,8,62,8)
131 dim_ambiental[ 'Elevada' ]= fuzz.gauss2mf(dim_ambiental.universe
    ,85,10,100,10)
132
133 # Para visualizar gráfico referente à dimensão ambiental
134 dim_ambiental.view()

```


Criação das regras difusas - 1ª fase

```

1
2 #Criação das regras de decisao difusas
3 #Definição das dimensões através das variaveis
4
5 #Caso da dimensao operacional
6
7 regra1= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Má'] &
8   ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Média'])
9 regra2= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Má'] &
10  ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Baixa'])
11 regra3= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Má'] &
12  ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Baixa'])
13 regra4= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Má'] &
14  ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Baixa'])
15 regra5= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Má'] &
16  ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Média'])
17 regra6= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Má'] &
18  ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Média'])
19 regra7= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Má'] &
20  ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Baixa'])
21 regra8= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Má'] &
22  ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Baixa'])
23 regra9= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Boa'] &
24  ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Média'])
25 regra10= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Boa'] &
26  ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Média'])
27 regra11= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Boa'] &
28  ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Baixa'])
29 regra12= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Boa'] &
30  ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Baixa'])
31 regra13= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Boa'] &
32  ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
33 regra14= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Boa'] &
34  ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Média'])
35 regra15= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Boa'] &
36  ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Média'])
37 regra16= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Má'] & potencia ['Muito Boa'] &
38  ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Baixa'])
39 regra17= ctrl.Rule(eficiencia['Má'] & potencia ['Muito Má'] &
40  ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Média'])
41 regra18= ctrl.Rule(eficiencia['Má'] & potencia ['Muito Má'] &
42  ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Média'])

```

```

25 regra19= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Muito Má' ] &
    ass_acustica[ 'Alta' ], dim_operacional[ 'Baixa' ])
26 regra20= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Muito Má' ] &
    ass_acustica[ 'Muito Alta' ], dim_operacional[ 'Baixa' ])
27 regra21= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Muito Baixa' ], dim_operacional[ 'Média' ])
28 regra22= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Baixa' ], dim_operacional[ 'Média' ])
29 regra23= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Alta' ], dim_operacional[ 'Média' ])
30 regra24= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Muito Alta' ], dim_operacional[ 'Baixa' ])
31 regra25= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Boa' ] & ass_acustica[ '
    Muito Baixa' ], dim_operacional[ 'Elevada' ])
32 regra26= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Boa' ] & ass_acustica[ '
    Baixa' ], dim_operacional[ 'Média' ])
33 regra27= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Boa' ] & ass_acustica[ '
    Alta' ], dim_operacional[ 'Média' ])
34 regra28= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Boa' ] & ass_acustica[ '
    Muito Alta' ], dim_operacional[ 'Baixa' ])
35 regra29= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Muito Boa' ] &
    ass_acustica[ 'Muito Baixa' ], dim_operacional[ 'Elevada' ])
36 regra30= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Muito Boa' ] &
    ass_acustica[ 'Baixa' ], dim_operacional[ 'Média' ])
37 regra31= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Muito Boa' ] &
    ass_acustica[ 'Alta' ], dim_operacional[ 'Média' ])
38 regra32= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Má' ] & potencia [ 'Muito Boa' ] &
    ass_acustica[ 'Muito Alta' ], dim_operacional[ 'Média' ])
39 regra33= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Muito Má' ] &
    ass_acustica[ 'Muito Baixa' ], dim_operacional[ 'Média' ])
40 regra34= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Muito Má' ] &
    ass_acustica[ 'Baixa' ], dim_operacional[ 'Média' ])
41 regra35= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Muito Má' ] &
    ass_acustica[ 'Alta' ], dim_operacional[ 'Média' ])
42 regra36= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Muito Má' ] &
    ass_acustica[ 'Muito Alta' ], dim_operacional[ 'Baixa' ])
43 regra37= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Muito Baixa' ], dim_operacional[ 'Elevada' ])
44 regra38= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Baixa' ], dim_operacional[ 'Média' ])
45 regra39= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Alta' ], dim_operacional[ 'Média' ])
46 regra40= ctrl.Rule(eficiencia[ 'Boa' ] & potencia [ 'Má' ] & ass_acustica[ '
    Muito Alta' ], dim_operacional[ 'Baixa' ])

```

```

47 regra41= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Boa'] & ass_acustica[
    'Muito Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
48 regra42= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Boa'] & ass_acustica[
    'Baixa'], dim_operacional['Média'])
49 regra43= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Boa'] & ass_acustica[
    'Alta'], dim_operacional['Média'])
50 regra44= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Boa'] & ass_acustica[
    'Muito Alta'], dim_operacional['Média'])
51 regra45= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
52 regra46= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
53 regra47= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Média'])
54 regra48= ctrl.Rule(eficiencia['Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Média'])
55 regra49= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Má'] &
    ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
56 regra50= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Má'] &
    ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Média'])
57 regra51= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Má'] &
    ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Média'])
58 regra52= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Má'] &
    ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Baixa'])
59 regra53= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Má'] &
    ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
60 regra54= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Má'] &
    ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
61 regra55= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Má'] &
    ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Média'])
62 regra56= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Má'] &
    ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Média'])
63 regra57= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Boa'] &
    ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
64 regra58= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Boa'] &
    ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
65 regra59= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Boa'] &
    ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Média'])
66 regra60= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Boa'] &
    ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Média'])
67 regra61= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Muito Baixa'], dim_operacional['Elevada'])
68 regra62= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Baixa'], dim_operacional['Elevada'])

```

```

69 regra63= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Alta'], dim_operacional['Elevada'])
70 regra64= ctrl.Rule(eficiencia['Muito Boa'] & potencia ['Muito Boa'] &
    ass_acustica['Muito Alta'], dim_operacional['Média'])
71
72 #Caso da dimensao economica
73
74 regra65= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
75 regra66= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Baixo'], dim_economica['Elevada'])
76 regra67= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Alto'], dim_economica['Elevada'])
77 regra68= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
78 regra69= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
79 regra70= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Elevada'])
80 regra71= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
81 regra72= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
82 regra73= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
83 regra74= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
84 regra75= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
85 regra76= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
86 regra77= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])
87 regra78= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
88 regra79= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
89 regra80= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Baixo'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
90 regra81= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
91 regra82= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Elevada'])
92 regra83= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Elevada'])

```

```

93 regra84= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
94 regra85= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
95 regra86= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
96 regra87= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
97 regra88= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
98 regra89= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])
99 regra90= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
100 regra91= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
101 regra92= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
102 regra93= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])
103 regra94= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
104 regra95= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Baixa'])
105 regra96= ctrl.Rule(c_aquisicao['Baixo'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
106 regra97= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
107 regra98= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Elevada'])
108 regra99= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
109 regra100= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Baixo'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
110 regra101= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
111 regra102= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
112 regra103= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
113 regra104= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
114 regra105= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])

```

```

115 regra106= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
116 regra107= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
117 regra108= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
118 regra109= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])
119 regra110= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Baixa'])
120 regra111= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Baixa'])
121 regra112= ctrl.Rule(c_aquisicao['Alto'] & c_manutencao['Muito Alto'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
122 regra113= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Elevada'])
123 regra114= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
124 regra115= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
125 regra116= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Baixo'] & c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Média'])
126 regra117= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])
127 regra118= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
128 regra119= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Média'])
129 regra120= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Baixo'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
130 regra121= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])
131 regra122= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Baixo'], dim_economica['Média'])
132 regra123= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Alto'], dim_economica['Baixa'])
133 regra124= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Alto'] &
    c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
134 regra125= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Muito Baixo'], dim_economica['Média'])
135 regra126= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Baixo'], dim_economica['Baixa'])
136 regra127= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Alto'], dim_economica['Baixa'])

```



```

137 regra128= ctrl.Rule(c_aquisicao['Muito Alto'] & c_manutencao['Muito
    Alto'] & c_operacao['Muito Alto'], dim_economica['Baixa'])
138
139 #Caso da dimensao ambiental
140
141 regra129= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
142 regra130= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
143 regra131= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Elevada'])
144 regra132= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Média'])
145 regra133= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Poluente']
    & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
146 regra134= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Poluente']
    & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
147 regra135= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Poluente']
    & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
148 regra136= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Poluente']
    & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Média'])
149 regra137= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
150 regra138= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
151 regra139= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
152 regra140= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Média'])
153 regra141= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['
    Extremamente Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['
    Elevada'])
154 regra142= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['
    Extremamente Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
155 regra143= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['
    Extremamente Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
156 regra144= ctrl.Rule(em_termica['Muito Baixa'] & subproduto['
    Extremamente Poluente'] & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['
    Baixa'])
157 regra145= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Pouco Poluente']
    & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
158 regra146= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Pouco Poluente']
    & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
159 regra147= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Pouco Poluente']
    & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])

```

```

160 regra148= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Pouco Poluente']
    & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Média'])
161 regra149= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
162 regra150= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
163 regra151= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
164 regra152= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Média'])
165 regra153= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Muito Poluente']
    & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
166 regra154= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Muito Poluente']
    & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
167 regra155= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Muito Poluente']
    & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
168 regra156= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Muito Poluente']
    & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
169 regra157= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Média'])
170 regra158= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
171 regra159= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
172 regra160= ctrl.Rule(em_termica['Baixa'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
173 regra161= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Pouco Poluente'] &
    tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
174 regra162= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Pouco Poluente'] &
    tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
175 regra163= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Pouco Poluente'] &
    tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
176 regra164= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Pouco Poluente'] &
    tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Média'])
177 regra165= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
178 regra166= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
179 regra167= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
180 regra168= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
181 regra169= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Muito Poluente'] &
    tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Média'])

```



```

182 regra170= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Muito Poluente'] &
    tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
183 regra171= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Muito Poluente'] &
    tamanho['Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
184 regra172= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Muito Poluente'] &
    tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
185 regra173= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Média'])
186 regra174= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
187 regra175= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
188 regra176= ctrl.Rule(em_termica['Alta'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
189 regra177= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Elevada'])
190 regra178= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
191 regra179= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Média'])
192 regra180= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Pouco
    Poluente'] & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
193 regra181= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Média'])
194 regra182= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
195 regra183= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
196 regra184= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Poluente'] &
    tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
197 regra185= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Média'])
198 regra186= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Média'])
199 regra187= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
200 regra188= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Muito
    Poluente'] & tamanho['Muito Alto'], dim_ambiental['Baixa'])
201 regra189= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Muito Baixo'], dim_ambiental['Média'])
202 regra190= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Baixo'], dim_ambiental['Baixa'])
203 regra191= ctrl.Rule(em_termica['Muito Alta'] & subproduto['Extremamente
    Poluente'] & tamanho['Alto'], dim_ambiental['Baixa'])

```

```
204 regra192= ctrl.Rule(em_termica[ 'Muito Alta' ] & subproduto[ 'Extremamente  
Poluente' ] & tamanho[ 'Muito Alto' ], dim_ambiental[ 'Baixa' ])
```

Criação dos sistemas de controlo e simulação

```

1
2 #Criar sistemas de controlo e simulação
3 #Dimensao operacional
4
5 dim_operacional_ctrl = ctrl.ControlSystem([regra1,regra2,regra3,regra4,
6     regra5,regra6,regra7,regra8,regra9,regra10,regra11,regra12,regra13,
7     regra14,regra15,regra16,regra17,regra18,regra19,regra20,regra21,
8     regra22,regra23,regra24,regra25,regra26,regra27,regra28,regra29,
9     regra30,regra31,regra32,regra33,regra34,regra35,regra36,regra37,
10    regra38,regra39,regra40,regra41,regra42,regra43,regra44,regra45,
11    regra46,regra47,regra48,regra49,regra50,regra51,regra52,regra53,
12    regra54,regra55,regra56,regra57,regra58,regra59,regra60,regra61,
13    regra62,regra63,regra64])
14
15 dim_operacional_sim = ctrl.ControlSystemSimulation(dim_operacional_ctrl)
16
17 #Adicionar valores correspondentes as caracteristicas dos diferentes
18     sistemas
19 #(Celulas de combustivel, Motores de Stirling, Turbinas a Vapor,
20     Motores a
21     Diesel) pertencentes a dimensao operacional
22
23 dim_operacional_sim.input['Eficiência'] = #colocar valor
24     correspondente
25 dim_operacional_sim.input['Potência'] = #colocar valor correspondente
26 dim_operacional_sim.input['Assinatura Acústica'] = #colocar valor
27     correspondente
28
29 #Calcular valores para a dimensao operacional,
30 #Tendo em conta valores ja adotados para eficiencia, potencia e
31 # assinatura acustica pelos 4 sistemas diferentes
32
33 dim_operacional_sim.compute()
34 dim_operacional_sim.output
35
36 # Para visualizar grafico referente a dimensao economica
37 # alcançada pelos diferentes sistemas
38
39 dim_operacional.view(sim=dim_operacional_sim)
40
41 #Dimensão economica
42

```

```

31 dim_economica_ctrl = ctrl.ControlSystem([regra65, regra66, regra67,
    regra68, regra69, regra70, regra71, regra72, regra73, regra74, regra75,
    regra76, regra77, regra78, regra79, regra80, regra81, regra82, regra83,
    regra84, regra85, regra86, regra87, regra88, regra89, regra90, regra91,
    regra92, regra93, regra94, regra95, regra96, regra97, regra98, regra99,
    regra100, regra101, regra102, regra103, regra104, regra105, regra106,
    regra107, regra108, regra109, regra110, regra111, regra112, regra113,
    regra114, regra115, regra116, regra117, regra118, regra119, regra120,
    regra121, regra122, regra123, regra124, regra125, regra126, regra127,
    regra128])
32
33 dim_economica_sim = ctrl.ControlSystemSimulation(dim_economica_ctrl)
34
35 #Adicionar valores correspondentes as características dos diferentes
    sistemas
36 #(Celulas de combustivel, Motores de Stirling, Turbinas a Vapor,
    Motores a
37 # Diesel) pertencentes a dimensao economica
38
39 dim_economica_sim.input['Custo de Aquisição'] = #colocar valor
    correspondente
40 dim_economica_sim.input['Custo de Manutenção'] = #colocar valor
    correspondente
41 dim_economica_sim.input['Custo de Operação'] = #colocar valor
    correspondente
42
43 #Calcular valores para a dimensao economica,
44 #Tendo em conta valores ja adotados para custo de aquisicao,
45 # custo de manutencao e custo de operacao pelos 4 sistemas diferentes
46
47 dim_economica_sim.compute()
48 dim_economica_sim.output
49
50 # Para visualizar grafico referente a dimensao economica
51 # alcançada pelos diferentes sistemas
52
53 dim_economica.view(sim=dim_economica_sim)
54
55 #Dimensao ambiental
56

```

```

57 dim_ambiental_ctrl = ctrl.ControlSystem([regra129,regra130,regra131,
    regra132,regra133,regra134,regra135,regra136,regra137,regra138,
    regra139,regra140,regra141,regra142,regra143,regra144,regra145,
    regra146,regra147,regra148,regra149,regra150,regra151,regra152,
    regra153,regra154,regra155,regra156,regra157,regra158,regra159,
    regra160,regra161,regra162,regra163,regra164,regra165,regra166,
    regra167,regra168,regra169,regra170,regra171,regra172,regra173,
    regra174,regra175,regra176,regra177,regra178,regra179,regra180,
    regra181,regra182,regra183,regra184,regra185,regra186,regra187,
    regra188,regra189,regra190,regra191,regra192])
58
59 dim_ambiental_sim = ctrl.ControlSystemSimulation(dim_ambiental_ctrl)
60
61 #Adicionar valores correspondentes as caracteristicas dos diferentes
    sistemas
62 #(Celulas de combustivel, Motores de Stirling, Turbinas a Vapor,
    Motores a
63 # Diesel) pertencentes a dimensao ambiental
64
65 dim_ambiental_sim.input['Emissão Térmica'] = #colocar valor
    correspondente
66 dim_ambiental_sim.input['Subproduto'] = #colocar valor correspondente
67 dim_ambiental_sim.input['Tamanho'] = #colocar valor correspondente
68
69 #Calcular valores para a dimensao ambiental,
70 #Tendo em conta valores ja adotados para emissao termica,
71 # subprodutos e tamanho pelos 4 sistemas diferentes
72
73 dim_ambiental_sim.compute()
74 dim_ambiental_sim.output
75
76 # Para visualizar grafico referente a dimensao ambiental
77 # alcançada pelos diferentes sistemas
78
79 dim_ambiental.view(sim=dim_ambiental_sim)

```

Criação dos antecedentes e consequente - 2ª fase

```

1
2 #Criação das subcategorias antecedentes
3 #Subcategoria – Dimensao operacional
4 dimensao_operacional=ctrl.Antecedent(np.arange(0,101,1), 'Dimensão
   operacional')
5
6 dimensao_operacional['Baixa']= fuzz.gauss2mf(dimensao_operacional.
   universe,0,10,15,10)
7 dimensao_operacional['Média']= fuzz.gauss2mf(dimensao_operacional.
   universe,38,8,62,8)
8 dimensao_operacional['Elevada']= fuzz.gauss2mf(dimensao_operacional.
   universe,85,10,100,10)
9
10 # Para visualizar grafico referente a dimensao operacional
11 dimensao_operacional.view()
12
13 #Subcategoria – Dimensão economica
14 dimensao_economica=ctrl.Antecedent(np.arange(0,101,1), 'Dimensão econó
   mica')
15
16 dimensao_economica['Baixa']= fuzz.gauss2mf(dimensao_economica.universe
   ,0,10,15,10)
17 dimensao_economica['Média']= fuzz.gauss2mf(dimensao_economica.universe
   ,38,8,62,8)
18 dimensao_economica['Elevada']= fuzz.gauss2mf(dimensao_economica.
   universe,85,10,100,10)
19
20 # Para visualizar grafico referente a dimensao economica
21 dimensao_economica.view()
22
23 #Subcategoria – Dimensao ambiental
24 dimensao_ambiental=ctrl.Antecedent(np.arange(0,101,1), 'Dimensão
   ambiental')
25
26 dimensao_ambiental['Baixa']= fuzz.gauss2mf(dimensao_ambiental.universe
   ,0,10,15,10)
27 dimensao_ambiental['Média']= fuzz.gauss2mf(dimensao_ambiental.universe
   ,38,8,62,8)
28 dimensao_ambiental['Elevada']= fuzz.gauss2mf(dimensao_ambiental.
   universe,85,10,100,10)
29
30 # Para visualizar grafico referente a dimensao ambiental
31 dimensao_ambiental.view()

```

```
32
33 #Decisao final (Nivel de Recomendacao)
34 recomendacao=ctrl.Consequent(np.arange(0,101,1), 'Nível de Recomendação
    ')
35
36 recomendacao['Muito Baixa']= fuzz.gauss2mf(recomendacao.universe
    ,0,5,10,5)
37 recomendacao['Baixa']= fuzz.gauss2mf(recomendacao.universe,23,5,33,5)
38 recomendacao['Média']= fuzz.gauss2mf(recomendacao.universe,45,5,55,5)
39 recomendacao['Elevada']= fuzz.gauss2mf(recomendacao.universe,68,5,78,5)
40 recomendacao['Muito Elevada']= fuzz.gauss2mf(recomendacao.universe
    ,90,5,100,5)
41
42 # Para visualizar grafico referente ao nivel de recomendacao
43 recomendacao.view()
```

Criação das regras difusas - 2ª fase

```

1
2 #Definição das dimensoes atraves do nivel de recomendacao
3
4 regra_1= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ], recomendacao[ 'Muito Baixa' ])
5 regra_2= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ], recomendacao[ 'Muito Baixa' ])
6 regra_3= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ], recomendacao[ 'Baixa' ])
7 regra_4= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ], recomendacao[ 'Muito Baixa' ])
8 regra_5= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ], recomendacao[ 'Baixa' ])
9 regra_6= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ], recomendacao[ 'Média' ])
10 regra_7= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ], recomendacao[ 'Baixa' ])
11 regra_8= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ], recomendacao[ 'Média' ])
12 regra_9= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Baixa' ] & dimensao_economica[ '
    Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ], recomendacao[ 'Média' ])
13 regra_10= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ], recomendacao[ 'Baixa' ])
14 regra_11= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ], recomendacao[ 'Baixa' ])
15 regra_12= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ], recomendacao[ 'Média' ])
16 regra_13= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ], recomendacao[ 'Baixa' ])
17 regra_14= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ], recomendacao[ 'Média' ])
18 regra_15= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ], recomendacao[ 'Elevada' ])
19 regra_16= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ], recomendacao[ 'Média' ])
20 regra_17= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ], recomendacao[ 'Elevada' ])
21 regra_18= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Média' ] & dimensao_economica[
    'Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ], recomendacao[ 'Elevada'
    ])
22 regra_19= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ],
    recomendacao[ 'Média' ])

```



```

23 regra_20= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ],
    recomendacao[ 'Média' ])
24 regra_21= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Baixa' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ],
    recomendacao[ 'Elevada' ])
25 regra_22= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ],
    recomendacao[ 'Média' ])
26 regra_23= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ],
    recomendacao[ 'Elevada' ])
27 regra_24= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Média' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ],
    recomendacao[ 'Muito Elevada' ])
28 regra_25= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Baixa' ],
    recomendacao[ 'Elevada' ])
29 regra_26= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Média' ],
    recomendacao[ 'Muito Elevada' ])
30 regra_27= ctrl.Rule(dimensao_operacional[ 'Elevada' ] &
    dimensao_economica[ 'Elevada' ] & dimensao_ambiental[ 'Elevada' ],
    recomendacao[ 'Muito Elevada' ])

```

Criação dos sistemas de controlo e simulação final

```

1
2 #Nível de recomendação
3 recomendacao_ctrl = ctrl.ControlSystem([regra_1, regra_2, regra_3, regra_4
    , regra_5, regra_6, regra_7, regra_8, regra_9, regra_10, regra_11, regra_12
    , regra_13, regra_14, regra_15, regra_16, regra_17, regra_18, regra_19,
    regra_20, regra_21, regra_22, regra_23, regra_24, regra_25, regra_26,
    regra_27])
4 recomendacao_sim = ctrl.ControlSystemSimulation(recomendacao_ctrl)
5
6 #Adicionar valores obtidos nas diversas dimensoes (dimensao operacional
    ,
7 # dimensao economica e dimensao ambiental), por forma a obter
8 # o nível de recomendação
9
10 recomendacao_sim.input['Dimensão operacional'] = dim_operacional_sim.
    output.get('Dimensão Operacional')
11 recomendacao_sim.input['Dimensão económica'] = dim_economica_sim.output
    .get('Dimensão Económica')
12 recomendacao_sim.input['Dimensão ambiental'] = dim_ambiental_sim.output
    .get('Dimensão Ambiental')
13
14 #Calcular valores para ao nível de recomendacao
15 recomendacao_sim.compute()
16 out = recomendacao_sim.output['Nível de Recomendação']
17 print(out)
18
19 # Para visualizar grafico referente ao nível de recomendação
20 #dos diferentes sistemas
21 recomendacao.view(sim=recomendacao_sim)

```

Validação dos dados

```

1 #Validação dos dados – Dimensao operacional
2 for i in range(0,11,1):
3     dim_operacional_sim.input['Eficiência'] = i*10 #colocar valor
correspondente
4     dim_operacional_sim.input['Potência'] = i #colocar valor
correspondente
5     dim_operacional_sim.input['Assinatura Acústica'] = 10-i #colocar
valor correspondente
6     dim_operacional_sim.compute()
7     out = dim_operacional_sim.output['Dimensão Operacional']
8     print(out)
9     norm_output = np.round((out-14.31)*100/(86.18-14.31),1)
10    print(i,norm_output)
11
12 #Validação dos dados – Dimensão economica
13 for i in range(0,11,1):
14     dim_economica_sim.input['Custo de Aquisição'] = 10-i #colocar valor
correspondente
15     dim_economica_sim.input['Custo de Manutenção'] = 10-i #colocar
valor correspondente
16     dim_economica_sim.input['Custo de Operação'] = 10-i #colocar valor
correspondente
17     dim_economica_sim.compute()
18     out = dim_economica_sim.output['Dimensão Económica']
19     print(out)
20     norm_output = np.round((out-14.63)*100/(85.18-14.63),1)
21     print(i,norm_output)
22
23 #Validação dos dados – Dimensao ambiental
24 for i in range(0,11,1):
25     dim_ambiental_sim.input['Emissão Térmica'] = 1000-i*100 #colocar
valor correspondente
26     dim_ambiental_sim.input['Subproduto'] = 10-i #colocar valor
correspondente
27     dim_ambiental_sim.input['Tamanho'] = 10-i #colocar valor
correspondente
28     dim_ambiental_sim.compute()
29     out = dim_ambiental_sim.output['Dimensão Ambiental']
30     print(out)
31     norm_output = np.round((out-14.55)*100/(85.18-14.55),1)
32     print(i,norm_output)
33
34

```

```

35 #Validação dos dados – Nível de Recomendação
36 for i in range(10,100,5):
37     recomendacao_sim.input['Dimensão operacional'] = i
38     recomendacao_sim.input['Dimensão económica'] = i
39     recomendacao_sim.input['Dimensão ambiental'] = i
40     recomendacao_sim.compute()
41     out = recomendacao_sim.output['Nível de Recomendação']
42     print(out)
43     norm_output = np.round((out-8.73)*100/(91.51-8.73),1)
44     print(i, norm_output)

```

Equação - Pesos

```

1 #Regra Auxilio – pesos
2 def function1 (x,y,z):
3     return (4.81*x + 3.43*y + 3.19*z)/11.43
4
5 out_R = function1 (dim_operacional_sim.output.get('Dimensão Operacional
6     '),dim_economica_sim.output.get('Dimensão Económica'),
7     dim_ambiental_sim.output.get('Dimensão Ambiental'))
8 print (out_R)

```

Gráficos 3D - Validação dos dados

```

1 from mpl_toolkits import mplot3d
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 matriz_0=np.zeros((11,11,11))
6 for k in range(11):
7     for j in range(11):
8         for i in range(11):
9             recomendacao_sim.input['Dimensão operacional'] = i*10
10            recomendacao_sim.input['Dimensão económica'] = j*10
11            recomendacao_sim.input['Dimensão ambiental'] = k*10
12            recomendacao_sim.compute()
13            out = recomendacao_sim.output['Nível de Recomendação']
14            matriz_0[i,j,k]=out
15
16 for i in range(11):
17     x = np.zeros((11,11))
18     y = np.zeros((11,11))
19     z = np.zeros((11,11))
20     # valores a por 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
21     i= i*10
22     it = np.int(i/10)
23     for j in range(11):
24         for k in range(11):
25             x[j,k] = j*10
26             y[j,k] = k*10
27             z[j,k] = matriz_0[it][j,k]
28             print(i,j,k)
29
30     fig = plt.figure()
31     ax = plt.axes(projection='3d')
32
33     ax.plot_surface(x, y, z,cmap='viridis', edgecolor='none')
34     ax.set_title('Valores de recomendação para Dimensão Operacional =
35     {}'.format(i))
36     ax.set_xlim(0,100)
37     ax.set_ylim(0,100)
38     ax.set_xticks([0,20,40,60,80,100])
39     ax.set_yticks([0,20,40,60,80,100])
40     ax.set_xlabel('Valores da Dimensão Económica')
41     ax.set_ylabel('Valores da Dimensão Ambiental')

```

Starplot - Nível de Recomendação

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 #Avaliacao atraves de Starlplot
5 #Classificacoes
6 classificacoes= ['Dimensão Operacional', 'Dimensão Económica', 'Dimensão
    Ambiental']
7
8 #Comparacao sistemas AIP
9 #Celulas de combustivel
10 celulas_combustivel = [79,42,79,]
11 celulas_combustivel = np.concatenate((celulas_combustivel,[
    celulas_combustivel[0]]))
12
13 #Motores de Stirling
14 motores_stirling = [50,50,42,]
15 motores_stirling = np.concatenate((motores_stirling,[motores_stirling
    [0]]))
16
17 #Turbinas a vapor
18 turbinas_vapor =[48,42,16,]
19 turbinas_vapor = np.concatenate((turbinas_vapor,[turbinas_vapor[0]]))
20
21 #Motores a diesel
22 motores_diesel =[18,50,50,]
23 motores_diesel = np.concatenate((motores_diesel,[motores_diesel[0]]))
24
25 #Juncao das tres subcategorias
26 label_placement = np.linspace(start=0, stop=2*np.pi, num=len(
    celulas_combustivel))
27 plt.figure(figsize=(6,6))
28 plt.subplot(polar=True)
29 plt.plot(label_placement, celulas_combustivel)
30 plt.plot(label_placement, motores_stirling)
31 plt.plot(label_placement, turbinas_vapor)
32 plt.plot(label_placement, motores_diesel)
33 lines, labels = plt.thetagrids(np.degrees(label_placement), labels=
    classificacoes)
34 plt.title('Resultados finais', y=1.1, fontdict={'fontsize':15})
35 plt.legend(labels=['celulas_combustivel', 'motores_stirling', '
    turbinas_vapor', 'motores_diesel'], loc=(1,0.8))

```